



Herausragende Masterarbeiten

Autor*in

Dr. Daniel Gehr

Studiengang

Nachhaltige Entwicklungszusammenarbeit, M.A.

Masterarbeitstitel

Pyrolyse von Biomasse zur Unterstützung der
Wärmewende im ländlichen Raum

R
TU
P

Distance and Independent
Studies Center
DISC

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	IV
Abkürzungsverzeichnis.....	V
1 Einleitung.....	1
1.1 Zielsetzung der Arbeit.....	1
1.2 Aufbau der Arbeit.....	2
1.3 Methodisches Vorgehen.....	2
2 Pyrolyse von Biomasse als Beitrag zur Lösung gegenwärtiger Umweltprobleme.....	3
2.1 Stand der Forschung zu Ursachen und prognostizierten Folgen des Klimawandels.....	3
2.2 Begrenztheit fossiler Energieträger.....	5
2.3 Kritische Betrachtung verschiedener Geoengineering-Technologien.....	6
2.4 Pyrolyse von Biomasse als mögliche Abhilfemaßnahme.....	9
2.4.1 Bisherige Erfahrungen und Beschreibung des Verfahrens.....	9
2.4.2 Nutzbare Resultate der Pyrolyse.....	10
2.4.2.1 Gewinnung von nutzbarer Wärmeenergie.....	10
2.4.2.2 Herstellung von Biokohle.....	10
2.4.2.3 Möglichkeiten und Risiken der Kohlenstoffsequestrierung durch Biokohle.....	11
2.4.2.4 Biologische, chemische und physikalische Effekte im Erdreich.....	11
3 Pyrolyse von Biomasse und nachhaltige Entwicklung.....	13
3.1 Beurteilung anhand des 3-Säulen-Modells der Nachhaltigkeit.....	13
3.1.1 Positive Auswirkungen auf die ökologische, soziale und ökonomische Dimension.....	13
3.1.2 Negative Auswirkungen auf die ökologische, soziale und ökonomische Dimension.....	13
3.2 Möglicher Beitrag zur Umsetzung einzelner SDGs der Agenda 2030.....	14
3.3 Pyrolyse von Biomasse als möglicher Beitrag zur nachhaltigen Wärmewende im ländlichen Raum.....	14
4 Betrachtung eines konkreten Modellbeispiels in Form eines Nahwärmenetzes.....	16
4.1 Beschreibung des Modellbeispiels „Nahwärmenetz Hechenwang“.....	17
4.2 Wärmebedarf vs. Wärmepotential.....	21
4.3 Verfügbarkeit und Qualität der eingesetzten Biomasse.....	23
4.4 Kostenkalkulation im Vergleich mit herkömmlichen Biomasseheizkesseln.....	25

5	Bewertung der im Rahmen des Modells betrachteten Biomasseheiztechniken.....	31
5.1	Grundsätzliche Bewertung.....	31
5.2	Lokaler Einfluss auf SDG-Indikatoren.....	33
5.2.1	Lokale SDG-Indikatoren im Vergleich zu globalen SDG-Indikatoren.....	33
5.2.2	Auswahl und Betrachtung geeigneter SDG-Indikatoren.....	36
6	Empfehlungen für einen konkurrenzfähigen Betrieb von Pyrolysatoren.....	45
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	50
	Quellen.....	55
	Anhang.....	66
	Anhang: Diverse Emailkonversationen.....	66
	Technisches zum Pyrolysator von Biomacon:.....	66
	Antworten in Bezug auf Förderbarkeit.....	66
	Eigenständigkeitserklärung.....	69

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Break-Even der Pyrolyse im Vgl. zum Hackschnitzelheizkessel bei Berücksichtigung von CO₂-Zertifikaten in Höhe von 200 €/t. Eigene Abbildung.....30

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Daten aus dem Jahr 2021 zur Anzahl der Zentralheizungsfeuerstätten aus dem Kkehrbuch des Kkehrbezirks Schondorf. Erhoben und zur Verfügung gestellt durch die Klimaschutzstelle des Landkreis Landsberg am Lech.....	18
Tabelle 2: Änderung von verschiedenen Klimadaten für das Südbayerische Hügelland nach zwei verschiedenen Klimaszenarien. Angegeben als Median, obere Grenze der Bandbreite der Simulation in Klammern. (Werte aus Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 2021a).....	19
Tabelle 3: Kostenvergleich beider Heizlösungen in Bezug auf Investition und Betriebskosten.....	29
Tabelle 4: Zusammenfassung der durch PyCCS beeinflussten SDGs, SDG-Unterziele und SDG-Indikatoren für Kommunen (nach Riedel et al., 2022).....	45

Abkürzungsverzeichnis

BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BayKlimaG	Bayerisches Klimaschutzgesetz
BECCS	bioenergy with carbon capture and storage
BEG	Bundesförderung effiziente Gebäude
BEW	Bundesförderung effiziente Wärmenetze
BMZ	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
CCS	carbon capture and storage
CCUS	carbon capture, utilisation and storage
CDR	carbon dioxide removal
CIEL	Center for International Environmental Law
DACCS	direct air carbon capture and storage
dena	Deutsche Energie-Agentur
difu	Deutsches Institut für Urbanistik
EBC	European Biochar Certification
GEG	Gebäudenergiegesetz
GHD	Gewerbe/Handel/Dienstleistung
HLPF	High-Level Political Forum
ICLEI	International Council for Local Environmental Initiatives
IEA	International Energy Agency
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
kWP	kommunale Wärmeplanung
LfU	Bayerisches Landesamt für Umwelt
LWF	Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft
NCP	nature's contributions to people

NE	Nachhaltige Entwicklung
NET	Negativemissions-Technologie
ppm	parts per million (Anzahl Teilchen pro Millionen Teilchen)
PyCCS	pyrogenic carbon capture and storage
RCP	Representative Concentration Pathways
SDG	sustainable development goal
sfv	Solarenergie Förderverein Deutschland e. V.
SRM	solar radiation management
StMELF Forsten	Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten
THG	Treibhausgas
UBA	Umweltbundesamt
UN	United Nations / Vereinte Nationen
VNR	voluntary national review
WBGU Umweltveränderungen	Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen
WMO	World Meteorological Organization

1 Einleitung

Der Dekarbonisierung des deutschen Energiesektors, der Wärmewende und der damit verbundenen Abkehr von fossilen Energieträgern kommt gegenwärtig ein zentraler Stellenwert in der politischen Agenda der Bundesrepublik zu. Dies ist sowohl in den Diskussionen und zahlreichen Stellungnahmen zu den Novellierungen des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) im Mai und Juni 2023¹, als auch im Gesetzentwurf vom 16.08.2023 zur *Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze*² zu erkennen. Im fertigen Gesetz solle eine Verpflichtung aller Kommunen zur kommunalen Wärmeplanung (kWP) festgeschrieben werden. Ein Großteil (ca. 80 %) der Energiequellen zur deutschen Wärmeversorgung ist 2020 noch fossilen Ursprungs (Deutsche Energie-Agentur (dena), 2022, S. 35). Die technische und politische Herausforderung liegt künftig insbesondere darin, Unabhängigkeit von Erdöl und Erdgas liefernden Staaten zu erreichen, klimaschädliche Technologien zu substituieren, die Dekarbonisierung in allen Sektoren voranzutreiben und die Bevölkerung und die Wirtschaft dabei nicht zu stark finanziell zu beanspruchen.

1.1 Zielsetzung der Arbeit

Chancen und Risiken aus Pflanzenverkohlung mittels Pyrolyse sollen im Hinblick auf deren Beitrag im Rahmen von Wärmeversorgung, Defossilisierung und anderer Themen in dieser Arbeit betrachtet werden. Es handelt sich dabei um eine Technologie, die der Menschheit schon lange bekannt ist, allerdings bisher wenig zum Einsatz kommt. Dabei könnte eine Kombination aus fossilfreier Nahwärmeversorgung, Nutzung nachwachsender regionaler Roh- und Abfallstoffe, Sequestrierung von atmosphärischem Kohlenstoff und mögliche positive Einflüsse auf die Qualität landwirtschaftlicher Böden durch das Einbringen von Pflanzenkohle sinnvoll sein. Konkret soll dies anhand eines Biomasse-Nahwärmeprojekts einer kleinen Gemeinde in Oberbayern untersucht werden. Fossilfreie Nah- und Fernwärmeversorgungen werden durch die Pflicht zur kWP künftig vermehrt auf den Tagesordnungen kommunaler Parlamente erscheinen.

1 <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Stellungnahmen/gebäudeenergiegesetz.html> (zugegriffen am 02.06.2023)

2 https://www.bmwsb.bund.de/SharedDocs/gesetzgebungsverfahren/Webs/BMWSB/DE/Downloads/kabinettsfassung/kommunale-waermeplanung.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (zug. am 16.9.2023)

Im Rahmen dieser Arbeit sollen Einflüsse dieser Technologie auf Treibhausgasemissionen in der Wärmewende, die Erfüllung von SDG-Indikatoren sowie Möglichkeiten, Pyrolysatoren ökonomisch kompetitiv im Vergleich zu gängigen Biomasseheizkesseln betreiben zu können, anhand des Beispiels untersucht werden.

1.2 Aufbau der Arbeit

In den Kapiteln 2 und 3 werden theoretische Grundlagen erläutert. Der aktuelle Klimawandel mit seinen Auswirkungen und wie ihm am besten begegnet werden kann, wird dabei in Zusammenhang mit der Möglichkeit von Kohlenstoffsequestrierung beleuchtet. Auf der Technik der Pyrolyse von Biomasse, um durch resultierende Pflanzenkohle Kohlenstoff dauerhaft aus der Atmosphäre zu entnehmen und auch Einflussmöglichkeiten auf nachhaltige Entwicklung durch Einsatz dieser Technik im Sektor der Wärmeversorgung soll hier das Hauptaugenmerk liegen.

Im 4. Kapitel wird ein konkretes Nahwärmeprojekt im ländlichen Oberbayern betrachtet und ein Biomasse-Pyrolysator als mögliche Wärmequelle mit einer gängigen Hackschnitzelheizkessel-Lösung verglichen. Das nachfolgende Kapitel 5 beleuchtet den Einfluss dieser Biomasseheiztechnik auf geeignete der internationalen Nachhaltigkeitsziele (engl.: *sustainable development goals*, SDG) im lokalen, nationalen und globalen Kontext. Das 6. Kapitel beschäftigt sich mit Möglichkeiten und Empfehlungen, die Technik der Pyrolyse als Heizlösung im ländlichen Raum attraktiver und ökonomisch leichter darstellbar zu gestalten.

Im 7. und letzten Kapitel gibt es eine abschließende Zusammenfassung und denkbaren Ausblick der behandelten Themen.

1.3 Methodisches Vorgehen

Die Arbeit ist eine Mischung aus theoretischer Literaturarbeit (v. a. Kapitel 2 und 3) und empirischer Erhebung von Daten und Fakten (v. a. Kapitel 4). In den Kapiteln 5 und 6 werden Schlüsse aus den vorangegangenen Kapiteln und den bestehenden SDGs gezogen und analysiert.

2 Pyrolyse von Biomasse als Beitrag zur Lösung gegenwärtiger Umweltprobleme

Der Klimawandel, seine Folgen und die nötige Energie- und Wärmewende sind die Hauptpunkte in der Motivation für das Verfassen dieser Arbeit. Daher werden in diesem Kapitel die theoretischen und wissenschaftlichen Erkenntnisse zu Klimawandel, fossilen Energieträgern und Möglichkeiten zur Entnahme und Bindung atmosphärischen Kohlenstoffs behandelt.

2.1 Stand der Forschung zu Ursachen und prognostizierten Folgen des Klimawandels

Zunächst werden die Begriffe *Wetter* und *Klima* unterschieden. Wetter bezeichnet den aktuellen physikalischen Zustand in der Atmosphäre. Dabei werden kurzfristige Messwerte, wie Temperatur, Wind oder Sonneneinstrahlung beschrieben. Klima dagegen ist der beobachtete Zustand der Atmosphäre über einen längeren Zeitraum (i. d. R. 30 Jahre). Dabei wird mit Mittelwerten und Trends gearbeitet.³

Der natürliche Treibhauseffekt (Bundeszentrale für politische Bildung, 2023) ist als Schulbuchwissen⁴ allgemein bekannt. Ohne ihn gäbe es auf der Erde aufgrund der Entfernung zur Sonne Durchschnittstemperaturen von lediglich -18 °C. Elektromagnetische Schwingungsenergie der von der Erdoberfläche reflektierten Infrarotstrahlung entweicht nicht ungehindert ins All. Sie wird teilweise in der Erdatmosphäre an Molekülen von Treibhausgasen (THG) in Bewegungsenergie und folglich Wärme in der Atmosphäre umgewandelt. Daraus resultiert eine globale Durchschnittstemperatur von ca. 15 °C. Erhöht sich die atmosphärische THG-Konzentration, durch z. B. Verbrennung kohlenstoffhaltiger Energieträger, wird weniger Energie ins All reflektiert und die Atmosphäre erwärmt sich (z. B. Felixberger, 2017, S. 197f).

Das wichtigste THG ist das ungiftige Kohlenstoffdioxid (CO₂) (Stuiver & Quay, 1981). Weitere THGs, wie z. B. Methan (CH₄) oder Distickstoffmonoxid (N₂O) besitzen kürzere atmosphärische Verweildauern aber stärkere unmittelbare Wirkungen auf den Treibhauseffekt. Zur Vergleichbarkeit werden weltweit gemäß Kyoto-Protokoll die Mengen der anderen THGs als CO₂-Äquivalente (CO₂eq) ermittelt und angegeben (UN, 1997).

3 <https://www.dwd.de/lexikon.html> (zug. am 27.06.2023)

4 <https://www.planet-schule.de/schwerpunkt/total-phaenomenal-erde-und-klima/treibhaus-erde-film-100.html> (zug. am 09.06.2023)

Die Erforschung der THGs beginnt im ersten Viertel des 19. Jahrhunderts. 1824 zeigt Fourier⁵, dass bestimmte Gase zur Erwärmung der Atmosphäre beitragen. Ende des 19. Jahrhunderts wird der Einfluss von CO₂ auf den Treibhauseffekt quantitativ berechnet und es wird auf den möglichen langfristigen Einfluss auf das Klima eingegangen (Arrhenius, 1896). 1958 beginnt Keeling mit der systematischen Aufzeichnung von atmosphärischen CO₂-Konzentrationen (Keeling, 1960). Diese Arbeit wird seitdem fortgesetzt und zeigt bei jährlicher Oszillation einen beständig ansteigenden Trend des atmosphärischen CO₂-Gehalts von 315,7 ppm (1958) auf 424 ppm im Juni 2023.⁶ Seit den späten 1950ern wusste die Ölindustrie von den Effekten des Verbrennens fossiler Rohstoffe auf das Klima⁷ und spätestens seit 1977 wurden die heutigen Klimawerte mit hoher Präzision durch Wissenschaftler von ExxonMobil vorhergesagt (Supran et al., 2023). Aktuelle Studien, Klimamodelle und Empfehlungen werden im 21. Jahrhundert durch den Weltklimarat (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)) zusammengetragen und in regelmäßigen Sachstandberichten analysiert. Mögliche Modelle des IPCC sind die sogenannten *representative concentration pathways* (RCP), die zeigen, wie sich der Klimawandel bei unterschiedlichen Maßen von THG-Emissionen möglicherweise auswirken wird (IPCC, 2014).

Während der letzten 420 Millionen Jahre gab es auf der Erde bei hohen atmosphärischen CO₂-gehalten (> 2000 ppm) verhältnismäßig niedrige Temperaturen. Dies kann den Schluss zulassen, dass der aktuell zu beobachtende Klimawandel anhand von gesteigerter Sonnenaktivität zu begründen sein könnte (Fleming, 2018). Betrachtet man weitere Variablen, wie die CO₂-Reduktion durch geologische Verwitterung oder Erhöhung pflanzlicher Biomasse und vergleicht dies mit der verstärkten Sonnenaktivität, gleichen sich die energetischen Effekte aus und die globalen Temperaturen bleiben nahezu konstant. Die Verbrennung fossiler Rohstoffe, die die Speicher der ursprünglich hohen atmosphärischen CO₂-Werte sind, bringt das über mehrere Millionen Jahre etablierte natürliche Gleichgewicht innerhalb weniger Jahre aus dem Tritt. Schnell ansteigende CO₂-Werte durch die Verbrennung fossiler Energieträger seit dem Beginn der Industrialisierung in Kombination mit der genannten verstärkten Sonnenaktivität kann Zustände, wie den anthropogenen Treibhauseffekt und Klimawandel mit sich

5 <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/klima-treibhauseffekt#geschichtliche-eckdaten-der-erforschung-des-treibhauseffektes-> (zug. am 11.06.2023)

6 <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/graph.html> (zug. am 27.06.2023)

7 <https://theconversation.com/what-big-oil-knew-about-climate-change-in-its-own-words-170642> (zug. am 13.06.2023)

bringen, wie es sie in geologischen Maßstäben bisher noch nicht gegeben hatte (Foster et al., 2017). Der aktuelle atmosphärische CO₂-Anstieg durch Verbrennung fossiler Brennstoffe ist durch Radioisotopenanalysen nachgewiesen und somit als anthropogen anzusehen (Stuiver & Quay, 1981; WMO, 2019).

Zusammenfassend sind einige Folgen des Klimawandels genannt: Zunahme an Wetterextremen, Versauerung der Meere durch gelöstes CO₂, Abschmelzen von Eismassen der Polarregionen, des Grönländischen Eisschildes und Gletscher weltweit, Auftauen Permafrost und Methaneis, was eine weitere THG-Freisetzung in die Atmosphäre bedeutet. Der Klimawandel hat damit auch Einfluss auf Ökosysteme, die Biodiversität und menschliche Lebensgrundlagen (z. B. Schwarz-Herion, 2018; BMZ, 2022). Speziell vor dem Überschreiten sogenannter irreversibler Kippunkte im Erdsystem in Bezug auf den Klimawandel wird durch die wissenschaftliche Gemeinschaft gewarnt (Wunderling et al., 2023; Richardson et al., 2023).

Die Weltgemeinschaft hat sich, um die Folgen des Klimawandels in einem für die Menschheit erträglichen Rahmen zu halten und um planetare Leitplanken (Rockström et al., 2009) einzuhalten, im Abkommen von Paris zur Einhaltung der globalen Erhöhung der Durchschnittstemperaturen bis 2100 von gut unter 2 °C, besser 1,5 °C, im Vergleich zum vorindustriellen Niveau geeinigt (UN, 2015a).

2.2 Begrenztheit fossiler Energieträger

Fossile Energieträger entstanden im Laufe vieler Millionen Jahre durch Abbauprozesse von Biomasse, wohingegen der menschliche Erdölkonsum in den vergangenen etwas mehr als 100 Jahren von Null auf inzwischen 4 Milliarden Tonnen p. a. angewachsen ist (z. B. Felixberger, 2017, Kap. 16.6). Die Internationale Energieagentur (IEA) geht allerdings von künftig deutlich sinkendem Verbrauch fossiler Energieträger durch Transformationsprozesse weltweit aus (IEA, 2023).

Dass die fossilen Energieträger, allen voran Erdöl, begrenzt sind und somit die Ausbeutung von Lagerstätten nach einer gewissen Zeit bis auf Null zurück geht, beschrieb erstmals ein Forscher von Shell. Auf seinen Forschungen basiert die Theorie von *peak oil* (Hubbert, 1949; Hubbert, 1956). *Peak oil* bedeutet, dass die Erdölförderung einer Lagerstätte oder eines Erdöl fördernden Landes oder der gesamten Welt irgendwann ein Maximum (= *peak*) erreicht und danach abnimmt. Der Zeitpunkt von *peak oil* ist damit

hypothetischer Natur, da beständig neue Ölquellen gefunden werden, bzw. bestehende Quellen durch technische oder ökonomische Entwicklungen länger ausbeutbar sind. Ähnliches gilt für den Abbau von Kohle und Erdgas. Dementsprechend unterliegen Prognosen über die Dauer der Verfügbarkeit ständigem Wechsel.

Durch den Vergleich von Ölpreisentwicklung und Weltwirtschaft zeigt sich ein Einfluss der Begrenztheit fossiler Energieträger auf die globale wirtschaftliche Entwicklung (Murray & King, 2012). Hohe Ölpreise am Weltmarkt führen häufig zu Rezessionen (Hamilton, 2009). Dieses sensible Reagieren der Wirtschaft ist ein Beleg für die begrenzte Verfügbarkeit bei gleichzeitig hohem Bedarf an fossilen Rohstoffen.

2.3 Kritische Betrachtung verschiedener Geoengineering-Technologien

Der beschriebene Einfluss der THGs auf die Klimaerwärmung macht es, neben der raschen Reduktion von THG-Emissionen überlegenswert, Kohlenstoff zusätzlich aus der Atmosphäre zu entnehmen. Obendrein liegt die Überlegung nahe, den solaren Energieeintrag in die Atmosphäre durch technische Lösungen einzuschränken.

Als mögliche Maßnahmen werden Geoengineeringlösungen, zu denen *solar radiation management* (SRM) oder aktives *carbon dioxide removal* (CDR) gehören, mit ihren Vor- und Nachteilen in wissenschaftlicher Gemeinschaft und Politik diskutiert.

Als direkten Eingriff in die Atmosphäre ist das SRM anzusehen. Dabei ist angedacht, Schirme oder Schwefelverbindungen in der Stratosphäre freizusetzen, um die Sonneneinstrahlung durch Reflexion zu reduzieren. Eine Erhöhung der Energiereflexion kann auch durch die künstliche Aufhellung großer Flächen oder die künstliche Genese von großen aufgehellten Wolkenfeldern erreicht werden, wie Voosen (2023) anhand des Einsatzes schwefelarmen Marinediesels, daraus resultierende geringere Wolkenbildung und daher möglicherweise steigende Ozeantemperaturen beschrieb. Die Energieaufnahme in der Atmosphäre soll so gesenkt werden, was zu ihrer Abkühlung führen könnte (Schwarz-Herion, 2018). Dagegen spricht, dass SRM als relativ drastische und irreversible Methode gesehen wird, welche außerdem nur an Symptomen arbeitet, nicht aber an den Ursachen der Klimaerwärmung. Eventuelle unvorhersehbare negative Auswirkungen auf das komplexe Klimasystem durch SRM sind schwer wieder zu korrigieren.⁸

8 <https://www.zdf.de/nachrichten/panorama/klima-srm-sonne-verdunklung-100.html#xtor=CS5-282>
(zug. am 11.07.2023)

Die folgenden Technologien werden im wissenschaftlichen Diskurs als Negativemissions-Technologien (NET) geführt. Kohlenstoff soll mit diesen NET aus der Atmosphäre entnommen werden (z. B. UBA, 2019). Dafür gibt es technische und biologische Lösungen. Einen guten Überblick findet man u. a. bei der NGO der Solarenergie Förderverein Deutschland e. V. (sfv) (sfv, 2021), bei staatlichen Institutionen, wie dem UBA (UBA, 2022a), dem Wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU, 2020, Kap. 3.1) oder in Fachbüchern (z. B. Schwarzherrion, 2018, Kap. 12).

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, CO₂ abzuscheiden und dann in unterschiedlichen unterirdischen Strukturen zu speichern. Der Überbegriff ist *carbon capture and storage* (CCS) (UBA, 2022a). Es bestehen erste Lösungen, CO₂ direkt aus der Luft zu entnehmen. Dabei spricht man von *direct air CCS* (DACCS). Eine andere Möglichkeit ist, bei Verbrennungsprozessen entstehendes CO₂ gleich abzuscheiden. Nutzt man hierfür nachwachsende Rohstoffe auf Pflanzenbasis, spricht man von *bioenergy CCS* (BECCS). Der Vorgang des Abscheidens und Verpressung in porösem Gestein oder großen Hohlräumen sind mit Energieaufwand verbunden. Dabei kann auch in Wasser gelöstes CO₂ verpresst werden, was durch die Druck- und Volumenänderungen untertage zu seismischen Risiken führen kann. Der dafür nötige hohe Wasserbedarf darf nicht außer Acht gelassen werden. Es kann nicht sicher gewährleistet werden, dass das eingelagerte CO₂ unwiederbringlich dort bleibt oder durch Leckagen wieder austreten könnte. Das UBA (2019) sieht BECCS durchaus als kritisch an im Hinblick auf Nahrungsmittelsicherheit und die Auswirkungen auf Ökosysteme. Die Bedeutung von CCS hält sich nach über 20 Jahren Erforschung in Deutschland in Grenzen. Es gibt ein Projekt, in dem bisher lediglich 67 kt CO₂ unterirdisch gebunden wurden. Im nationalen Inventarbericht der Bundesregierung wird diese geringe Menge nicht berücksichtigt (UBA, 2023).

Eine durchweg kritische Methode in dem Zusammenhang ist das *carbon capture, usage and storage* (CCUS). Dabei wird CO₂ aus einem Verbrennungsprozess direkt abgeschieden und beim unterirdischen Einspeichern genutzt. Die Nutzung resultiert üblicherweise darin, in Lagerstätten fossiler Rohstoffe (Erdöl, Erdgas), den Druck zu erhöhen und diese so weiter ausbeuten zu können. Zu den bereits beschriebenen Schwierigkeiten, des Transports und dauerhaften Einlagerung kommt hier hinzu, dass durch die

erhöhte Förderung unter dem Strich mehr unterirdisch fossil gebundener Kohlenstoff freigesetzt wird, als ohne die Druckerhöhung möglich gewesen wäre.

Weitere CDR-Lösungen basieren auf der verstärkten Nutzung von Ökosystemleistungen (WBGU, 2020, Kap. 2.2).

Wiedervernässung von Mooren und Wiederaufforstung werden als klassische NET-Methoden ohne große ökologische Risiken und Nebenwirkungen angesehen. Dabei werden durch Renaturierungsmaßnahmen natürliche Kohlenstoffsinken geschaffen und der Biodiversitätskrise aktiv begegnet (WBGU, 2020). Die Bedeutung von Ökosystemen u. a. zur Kohlenstoffbindung wurde auch am 12.07.2023 durch das EU-Parlament durch die Verabschiedung des Renaturierungsgesetzes erkannt.⁹

Ein direkter Eingriff in ein Ökosystem ergibt sich durch die großflächige Düngung von Meeren und Ozeanen mit Eisenverbindungen, um Algenwachstum zu forcieren. Algen binden CO₂, sterben ab und sinken als Kohlenstoffsinke auf den Meeresgrund. Die Einflüsse auf das marine Ökosystem sind momentan nicht absehbar (UBA, 2019).

Die Verkohlung von Biomasse (z. B. Pflanzen oder pflanzliche Reste, Klärschlamm, Gülle) und die anschließende Speicherung der resultierenden Kohle wird als *pyrogenic* CCS (PyCCS) bezeichnet. Das Verfahren wird in Kapitel 2.4 genauer beleuchtet.

Ein großes Problem, das mit dem Einsatz aller genannten Technologien mit hoher Wahrscheinlichkeit gegeben sein wird, ist, dass bei vermehrtem Einsatz, das Ziel die globalen THG-Emissionen zu senken, in den Hintergrund rückt und ein Weiter-so-wie-bisher durch Politik und Industrie verteidigt werden wird. Dabei wird übersehen, dass in diesem Fall die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre, mit all ihren in Kapitel 2.1 beschriebenen Effekten auf die globalen Temperaturen, die Klimaerwärmung und den Einfluss auf die Erreichung von Kipppunkten im globalen Klimasystem (Lenton et al., 2008), unverändert hoch bleiben wird, wenn nur die zum Zeitpunkt der Entnahme emittierten THGs gleich wieder gebunden werden.

Aktuell werden jährlich ca. 2 Gt CO₂ durch CDR-Maßnahmen aus der Atmosphäre entnommen. Ein Promille dieser Menge entfällt auf technische Lösungen (BECCS, PyCCS, DACCS). Der große Rest wird durch Ökosystemleistungen überwiegend in Form von forstwirtschaftlichen Maßnahmen erreicht (Smith et al., 2023).

9 <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20230707IPR02433/nature-restoration-law-measures-adopt-position-for-negotiations-with-council> (zug. am 13.07.2023)

Das jährliche CO₂-Bindungspotenzial und die Kosten (bis zu US\$ 3450 pro t CO₂) der einzelnen Methoden variieren stark (WBGU, 2020, S. 60f; IPCC, 2022). Im besten Fall werden bei Skalierung aller CDR-Maßnahmen jährlich 181 Gt CO₂ bis zum Jahr 2100 gebunden. Gemäß IEA werden aktuell ca. 45 Mt CO₂ p. a. durch CCS gespeichert.¹⁰ Zusammen mit den Berichten über die Klimaerwärmung ist in diesem Zusammenhang kritisch zu beachten, dass in den jüngsten IPCC-Sachstandsberichten (IPCC, 2021, 2022a, 2022b), welche ein wichtiges Entscheidungskriterium für Politiker in Klimawandelfragen sind, ein verhältnismäßig großes Augenmerk auf CDR- und CCS-Technologien gelegt wird und die benötigte Technologietransformation weg von fossilen Energieträgern darin nicht mit letzter Konsequenz empfohlen wird (CIEL, 2023). Obendrein ist festzuhalten, dass trotz Einsatz von CCS bisherige fossile Anwendungen nicht THG-neutral betrieben werden können (UBA, 2023d).

2.4 Pyrolyse von Biomasse als mögliche Abhilfemaßnahme

Zur Steigerung der Energiesicherheit bei gleichzeitiger Dekarbonisierung des Energiesektors ist ein Umstieg von den begrenzten fossilen auf erneuerbare Energiequellen vonnöten (z. B. Schwarz-Herion, 2015; UBA, 2019).

Eine Möglichkeit, die benötigte CO₂-Sequestrierung in Kombination mit dem Ziel, die Energieversorgung auf nachwachsende Energieträger zu transformieren, kann PyCCS sein. PyCCS in Form von pyrolysierten organischen Reststoffen wird als CDR-Technologie mit geringen Risiken angesehen. Obendrein ergeben sich durch die Anwendung weitere Synergien. PyCCS hat einen potenziellen Anteil von jährlich bis zu 35 Gt an gebundenem CO₂. Die Kosten dafür liegen zwischen 10 und 345 US\$/t (WBGU, 2020). Eine aktuelle Zusammenfassung der Technologie findet sich bei Joseph et al. (2021), auf welche sich die folgenden (Unter)Kapitel überwiegend beziehen.

2.4.1 Bisherige Erfahrungen und Beschreibung des Verfahrens

Die bodenverbessernde und humusbildende Wirkung von Kohle wurde bereits gegen Ende des 19./Anfang des 20. Jahrhunderts anhand von Terra-preta-Erden im Amazonasgebiet beschrieben (z. B. Katzer, 1903, S. 67ff). Hier wurden vermutlich zufällig durch

¹⁰ <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage> (zug. am 10.08.2023)

indigene Völker Kohlereste gemeinsam mit Abfällen und Fäkalien in Böden eingebracht. Dadurch entstanden schlussendlich nährstoffreiche Böden im Regenwald.

Heute wird Biokohle bereits in industriellen Prozessen in sogenannten Pyrolysatoren verschiedenster Dimensionierung hergestellt. Dabei wird organisches Material als Ausgangsstoff in einer sauerstoffarmen Atmosphäre bei hohen Temperaturen (350 - 1000 °C) in sogenannten Pyrolysatoren verkohlt (EBC, 2023). Mögliche Ausgangsstoffe dafür sind z. B. Pflanzenteile, Gülle, Klärschlamm oder Abfälle aus der Lebensmittelindustrie. CO₂ und weitere schädliche Abgase entstehen dabei kaum (Gerber, 2009).

2.4.2 Nutzbare Resultate der Pyrolyse

Als Ergebnisse der Pyrolyse gibt es auskoppelbare Wärmeenergie, Pyrolysegas, Pyrolyseöl und vielfältig nutzbare Pflanzenkohle. Öl und Gas werden meist als Brennstoff für den autothermen Pyrolyseprozess genutzt, der dadurch aufrechterhalten wird (EBC, 2023), sind aber auch als Rohstoffe für die chemische Industrie denkbar.

2.4.2.1 Gewinnung von nutzbarer Wärmeenergie

Bei der Pyrolyse entsteht beim Verkohlungsprozess auskoppelbare Abwärme. Diese kann in verschiedenen Anwendungen genutzt werden. Als Beispiele sind hier die Trocknung von Heu oder den zu pyrolysierenden Substraten, was für den Pyrolyseprozess selbst förderlich ist (z. B. Hackschnitzel, Klärschlamm), Stromproduktion oder die thermische Energieabgabe in Form von Grundlast in wirtschaftlichen Prozessen oder Wärmenetzen zur Beheizung von Liegenschaften genannt (EBC, 2023).

2.4.2.2 Herstellung von Biokohle

Die beim Pyrolyseprozess entstandene Pflanzenkohle hat verschiedenste Eigenschaften und damit auch diverse Anwendungsmöglichkeiten. Diese hängen vom Ausgangsrohstoff und den Prozessbedingungen bei der Pyrolyse ab (Ding et al., 2016; Paetsch et al., 2018). Die Biokohle aus Holzhackschnitzeln ergibt gröbere Partikel mit größeren Mikroporen als z. B. diejenige aus Grasschnitt. Die Prozesstemperaturen haben noch einen Einfluss auf weitere Bestandteile der Kohle (Joseph et al., 2021). Kohle ist thermisch in Verbrennungsprozessen nutzbar. Diese würde den gespeicherten Kohlenstoff wieder als THG in die Atmosphäre entlassen. Die hergestellte Pflanzenkohle hat eine hohe Porosität und ist als Aktivkohle in Filterungsprozessen einsetzbar. In der Landwirtschaft gibt es mehrere Einsatzmöglichkeiten. Pflanzenkohle kann im Boden einge-

bracht werden. Details dazu werden in den Kapiteln 2.4.2.3 und 2.4.2.4 behandelt. Die Kohle kann als Einstreuzusatz in Tierställen dienen oder als Futterzusatz in der Nutztierhaltung gegeben werden.

2.4.2.3 Möglichkeiten und Risiken der Kohlenstoffsequestrierung durch Biokohle

Durch die Herstellung der Pflanzenkohle wird der Atmosphäre durch die vorgelagerte pflanzliche Photosynthese aktiv CO₂ entnommen. Der Kohlenstoff aus dem CO₂ wird zur Pflanzenkohle. Pro Masseneinheit entstandener Pflanzenkohle werden so je nach Ausgangsrohstoff bis zu 3,6 Masseneinheiten CO₂ gebunden. Durch die Anwendung als Bodenzusatz oder in der Zementherstellung wird der Kohlenstoff so für längere Zeiträume gebunden und wird während dieser Zeit nicht mehr in Form von THGs wirksam. Durch die Untersuchung der ursprünglichen Terra-preta-Böden geht man davon aus, dass sich im Boden gespeicherter Kohlestoff wenn überhaupt nur langsam abbaut (Glaser & Birk, 2012). Im landwirtschaftlich genutzten Boden in Deutschland können pro Hektar und Jahr 0,25 - 1 t Pflanzenkohle unter wirtschaftlichen Bedingungen eingebracht werden.¹¹ Je nach Bodensubstrat spricht man von bis zu 50 t/ha, die in den Boden eingebracht, positive Effekte erzielen (Joseph et al., 2021). Zur besseren Verständlichkeit, 1 t pro ha entspricht 0,1 kg pro m². D. h. Bei 50 t/ha würden 5 kg Biokohle pro m² in den Boden eingearbeitet und so bis zu 18 kg CO₂ pro m² oder 180 t CO₂ pro ha langfristig gebunden. Problematisch kann es nur durch Ertragseinbußen werden, wenn ungeeignete Biokohle (unpassender Rohstoff, falsche Prozessbedingungen) zum falschen Zeitpunkt eingebracht wird (Joseph et al., 2021).

Das grundsätzliche Risiko, welches allen CDR-Technologien anhängt, bleibt bei PyCCS erhalten, dass durch den Einsatz ein unverändertes Wirtschaften kompensiert wird und echte Technologietransformationen unterbleiben.

Mit Schadstoffen belastete Biokohle kann diese Schadstoffe auch in den Boden einbringen (UBA, 2016). Ein regelmäßiges Monitoring der Bestandteile ist daher ratsam.

2.4.2.4 Biologische, chemische und physikalische Effekte im Erdreich

Landwirtschaftliche Böden sind zunehmend verdichtet, was negativen Einfluss auf Wasseraufnahmefähigkeit, Wurzelwachstum und Ertrag hat (Keller et al., 2019).

11 Prof. Dr. Daniel Kray, HS Offenburg: <https://fyi-landwirtschaft5.org/> (zug. am 13.07.2023)

Eingebrachte Pflanzenkohle kann diesen Effekten durch Auflockerung und erleichtertes Eindringen von Wasser ins Substrat (Joseph et al., 2021) entgegenwirken.

Kohle selbst ist ein chemisch sehr inertes Produkt, welches nicht spontan chemische Bindungen eingeht, sich daher auch nicht schnell im Boden abbaut und somit als Kohlenstoffspeicher im Boden für viele Jahre verbleibt (Glaser & Birk, 2012).

Es werden kurzfristige (1 - 3 Wochen nach Applikation), mittelfristige (1 - 6 Monate) und langfristige Effekte (> 6 Monate) unterschieden. Die Auswirkungen hängen vom Ausgangsstoff und den Pyrolysebedingungen ab. Chemisch kurzfristig können sich gelöster organischer Kohlenstoff, Ionengehalte, Nährstoffabgabe und pH-Wert erhöhen. Physikalisch werden kurzfristig Wasseraufnahmefähigkeit und Porosität erhöht, Bodendichte und Versiegelung werden verringert. Dadurch ändern sich kurzfristig die Durchlüftung und die Möglichkeit, dass Wurzeln leichter in den Boden eindringen können. Der Keimungsprozess kann positiv beeinflusst werden. Mittelfristig beginnen, die Wurzeln, mit der Biokohle zu interagieren und das mikrobiologische Ökosystem ändert sich, was zur Zunahme von organischem Kohlenstoff im Boden führt. Physikalisch und chemisch erhöht sich mittelfristig die Oberfläche und Porosität, was zur Ausbildung funktionaler Gruppen an der Oberfläche führt. Dies erhöht die Aufnahme von Ionen und weiteren Partikeln an der Kohlenoberfläche. Als vorteilhaft zeigt sich die Diffusion von THGs (N_2O und CH_4) und Ammoniak in die Poren, wo diese oxidieren können. Ebenso können virulente Bestandteile adsorbiert werden, was die Ausbreitung von Krankheiten im Wurzelbereich vermindert. Langfristig erhöht sich durch gebundene organische Partikel die Verfügbarkeit von Stickstoff, Phosphor und anderen Nährstoffen zur Aufnahme von Pflanzen. Schädliche Schwermetalle werden gebunden und immobilisiert und so durch Pflanzen vermindert aufgenommen. Grundwasserkontamination mit Nitraten und Giftstoffen wird dadurch auch reduziert. Konglomeratbildung führt zur stabilen Speicherung von Kohlenstoff im Bodensubstrat (vgl. Joseph et al., 2021).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bei korrekter Anwendung eine Ertragssteigerung beobachtbar ist, der Wasserhaushalt sich verbessert und der Einsatz von Kunstdüngern reduziert werden kann, was auch zu einer Reduktion von THG-Emissionen führt.

3 Pyrolyse von Biomasse und nachhaltige Entwicklung

Nachdem die Technik von Pyrolyse in Kapitel 2 als Möglichkeit der Kohlenstoffsequestrierung genannt wurde, soll nun auf die Effekte und Resultate der Pyrolyse mit ihrem Potenzial für die nachhaltige Entwicklung (NE) eingegangen werden.

3.1 Beurteilung anhand des 3-Säulen-Modells der Nachhaltigkeit

Nachhaltigkeit fußt auf den drei Säulen Ökologie, Ökonomie und Soziales, die alle betrachtet und erfüllt sein müssen. Als Voraussetzung, dass NE gelingt, darf ökonomisches Wachstum, nicht auf Kosten von Umwelt (Ökologie) und Menschen (Soziales) geschehen (Hauff, 2019). Ein Leitfaden für NE sind die 17 SDGs, zu deren Erfüllung sich die Weltgemeinschaft verpflichtet hat (UN, 2015b).

3.1.1 Positive Auswirkungen auf die ökologische, soziale und ökonomische Dimension

Durch die Pyrolyse von Biomasse ergeben sich global vielfältige positive Aspekte für die NE. Die nötige Wärmewende (UBA, 2023a) kann vorangetrieben werden und der Anteil des Gebäudesektors an THG-Emissionen durch NET aktiv reduziert werden. In landwirtschaftlichen und urbanen Räumen können Grünschnitt, Abfallholz, Klärschlamm, Dung verwertet werden. Dabei reduzieren sich z. B. Entsorgungskosten von Grünschnitt oder Klärschlamm für Kommunen. Konsequente Umsetzung von Pyrolysetechniken generiert zusätzlich Arbeitsplätze, reduziert invasive Arten und THG-Ausstoß. Dies wird mit Synergien für die Biodiversität und lokaler Wertschöpfung bereits im globalen Süden umgesetzt.¹² Die Verwendung der Biokohle im Boden kann zu gesteigerten Erträgen führen (Ye et al., 2020) und so positiv für die Nahrungsmittelsicherheit sein. Im globalen Maßstab ist auf das Potenzial, die Klimaerwärmung durch Pyrolyse als NET bei überschaubaren Kosten zu begrenzen, hinzuweisen (Smith, 2016).

3.1.2 Negative Auswirkungen auf die ökologische, soziale und ökonomische Dimension

Das UBA (2023a) sieht allgemein bei der Verwendung von Biomasse zur defossili-

¹² <https://char2cool.org/co2-kompensation-mit-wasserhyazinthen/> (zug. am 13.07.2023)

sierten Energieversorgung Probleme beim Potenzial verfügbarer Biomasse. Dies kann zu Konkurrenzsituationen mit der landwirtschaftlichen Lebensmittelproduktion und so zu Problemen mit der Lebensmittelsicherheit führen. Der Einfluss auf Böden ist genau zu evaluieren. V. a. die Verwendung belasteter Biokohle aus bspw. Klärschlamm und die damit potenzielle Kontamination von landwirtschaftlichen Böden ist im Hinblick auf die Lebensmittelproduktion genau zu prüfen (UBA, 2016). Bei nachwachsenden Rohstoffen gibt es auch immer wieder Unwägbarkeiten bei der Preisentwicklung, wobei dies auch bei fossilen Energieträgern zu beobachten ist.

3.2 Möglicher Beitrag zur Umsetzung einzelner SDGs der Agenda 2030

Eine Übersichtsarbeit zum Beitrag verschiedener CDR-Technologien von Smith und Kollegen (2019) beschreibt auch den Einfluss von PyCCS auf die 18 *nature's contributions to people* (NCP) (Díaz et al., 2018) und auf die 17 SDGs. Die zwölf durch pyrolysierte Pflanzenkohle beeinflussten SDGs sind: 1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 und 15. Im fünften Kapitel wird näher auf die Einflüsse von PyCCS auf SDGs im konkreten Modellbeispiel eingegangen, daher erscheint an dieser Stelle nur die kurze Aufzählung.

3.3 Pyrolyse von Biomasse als möglicher Beitrag zur nachhaltigen Wärmewende im ländlichen Raum

Der Einsatz von Biokohle bringt im Sinne der nachhaltigen Wärmewende vielfältige Synergien. Es wird Wärme erzeugt, Abgase halten sich vergleichsweise in Grenzen und die erzeugte Kohle bringt vor allem ökologische Chancen bei ökonomischen Möglichkeiten, ohne dass signifikante Kosten in der sozialen Dimension entstehen.

Böden sind die Lebensgrundlage für die Menschheit. Auf ihnen wird Landwirtschaft zur Lebensmittelproduktion betrieben. Sie speichern Kohlenstoff, filtern Giftstoffe und dienen als vielfältige Lebensräume dem Erhalt der Biodiversität. Der Erhalt von gesunden Böden und die Verbesserung degradierter Böden sollte daher im Rahmen nachhaltiger Entwicklung im globalen Interesse aller sein. Dabei hat die Landwirtschaft eine hohe Verantwortung, dies durch entsprechende Bodennutzung zu gewährleisten. Das Einbringen von Biokohle aus Pyrolyse in die Böden kann dabei unterstützen.

Erfolgreich umgesetzte Pyrolyseprojekte im deutschsprachigen Raum aber auch weltweit zeigen betriebswirtschaftliche Rentabilität bei positiven Effekten auf Energieversorgung und Reststoffentsorgung mit den in Kapitel 2.4.2 genannten Effekten. Bei der IWB-Basel¹³ wird Pflegerestholz aus näheren Umgebung thermisch verwertet und die resultierende Pflanzenkohle als Dünger in der Region verkauft. Die Abfallwirtschaftsgesellschaft Neckar-Odenwald-Kreis¹⁴ verwertet auch Grünabfälle aus der Umgebung. Die bei der Pyrolyse entstehende Wärme dient der Trocknung der zu verwertenden Substrate. Der Zweckverband Frohnbach in Sachsen¹⁵ nutzt eine Pyrolyseanlage zur Trocknung und anschließenden Verkohlung von Klärschlamm, welcher sonst aufwändig entsorgt werden müsste. Aus dem Klärschlamm entsteht dabei auch nutzbare Biokohle.

13 <https://www.iwb.ch/angebote/produkte/pflanzenkohle> (zug. Am 04.07.2023)

14 <https://www.awn-online.de/z-e-u-s/realisierte-projekte/biomassezentrum> (zug. Am 04.07.2023)

15 <https://www.zvfrohnbach.de/wissenswertes/zentrales-klaerwerk/> (zug. am 04.07.2023)

4 Betrachtung eines konkreten Modellbeispiels in Form eines Nahwärmenetzes

In ihrem „Gebäudereport 2023“ beschreibt die dena eine hohe Abhängigkeit der deutschen Wärmeversorgung im Gebäudebereich von fossilen Energieträgern bundesweit von ca. 80 % und von über 75 % im Freistaat Bayern (dena, 2022, S. 34 ff). Hinzu kommt, dass die aktuell in Deutschland knapp 24 Millionen verbauten Heizungen im Gebäudebestand ein Durchschnittsalter von 17 Jahren aufweisen. 40 % der Heizanlagen sind älter als 20 Jahre, was unabhängig von der aktuellen und künftig zu verwendenden Heiztechnologie eine hohe jährliche Austauschrate infolge des Alters der Anlagen bedeutet. Hier bietet sich, neben der Effizienzsteigerung im Gebäudesektor durch Sanierungs- und Dämmmaßnahmen, eine Möglichkeit der Transformation zu fossilfreien Heiztechnologien durch den altersbedingten Austausch der Anlagen an. Dadurch kann auch automatisch das Ziel der Dekarbonisierung zur Senkung der THG-Emissionen Schritt für Schritt erreicht werden. Nah- und Fernwärmenetze, welche mit fossilfreien und regenerativen Wärmeenergiequellen zentral betrieben werden, sind eine Alternative zum dezentralen Austausch von Heizungen in jedem einzelnen Gebäude. Die Möglichkeit des Einsatzes von Wärmenetzen ist insofern auch volkswirtschaftlich sinnvoll, wenn man die hohen einmaligen Grundkosten bei der Installation mit den Kosten für die entsprechende Anzahl an Einzelheizungen im Laufe von 50 bis 100 Jahren realistischer Betriebszeit des Netzes gegenrechnet. Die einzelnen Anschlussnehmer haben während des Betriebs obendrein keine Kosten für Wartung und Kaminkehrer (Lygnerud and Werner, 2021).

Nahwärme oder Fernwärme bezeichnen beide das gleiche Konzept zur Wärmeversorgung mehrerer Wärme abnehmender Liegenschaften (Wärmesenken). Nahwärmenetze sind kleiner. In Fernwärmenetzen wird aufgrund der Wärmeverluste im längeren Leitungssystem des Wärmenetzes üblicherweise mit höheren Betriebstemperaturen ($> 90 \text{ °C}$) gearbeitet als in Nahwärmenetzen ($< 90 \text{ °C}$). Allerdings liegt eine klare Definition, wann ein Wärmenetz als Nah- oder Fernwärmenetz gilt, nicht vor. Die Wärmesenken sind über ein thermisch gedämmtes, oft erdverlegtes Rohrsystem mit einer Heizzentrale verbunden. In der Heizzentrale wird Wasser als Trägermedium der Wärmeenergie erhitzt und mittels elektrisch betriebener Pumpen im hydraulischen Rohrsystem des Netzes verteilt. Es bieten sich verschiedene

Technologien für die Wärmeerzeugung in der Heizzentrale an. Diese können klassisch mit fossilen Brennstoffen, über verschiedenste Wärmepumpen bis hin zu Biomasseheizkesseln, (Industrie-)Abwärme, Solar- oder Tiefengeothermie betrieben werden. In jeder Liegenschaft ist die Hausstation über einen eigenen Hausanschluss mit dem Vorlauf des Netzes verbunden. Dort wird mittels einer Wärmeübergabestation die thermische Energie ins Heizungs- und Warmwassersystem des Hauses übernommen. Oft sind in der Haustechnik kleine dezentrale Wärmespeicher zum Lastmanagement und zur Pufferung integriert. Über den Rücklauf des Netzes wird das in der Wärmeübergabestation abgekühlte Wasser an die Heizzentrale rückgeführt (Weidlich, 2020). Die Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf und Rücklauf wird als Temperaturspreizung bezeichnet.

Zunächst soll der Ort Hechenwang, in dem ein Wärmenetz dritter Generation (Weidlich, 2020) angedacht ist, u. a. anhand seiner geographischen Lage, der Bevölkerung, Bebauung und der Klimaregion, in welcher er liegt, charakterisiert werden. Danach geht es um die modellhaften technischen und ökonomischen Überlegungen zum Nahwärmenetz.

Es handelt sich um eine Modellbetrachtung. Modelle sind vereinfachte Abbildungen von realen Prozessen und Zuständen, die einem erleichterten Überblick dienen sollen.¹⁶ Die Vereinfachung bedeutet im hier vorgestellten Fall, dass die hypothetischen Wärmenetze ohne Redundanzlösung auskommen, Heizlastprofile im Jahresverlauf nicht berücksichtigt werden und im Falle des Pyrolysators nur ein konkretes, marktreifes Modell zur Betrachtung herangezogen wird.

4.1 Beschreibung des Modellbeispiels „Nahwärmenetz Hechenwang“

Der Ort Hechenwang ist ein Ortsteil der Gemeinde Windach im oberbayerischen Landkreis Landsberg am Lech und liegt nur wenige Kilometer westlich des Ammersees im Voralpenland. Er befindet 594 m über dem Meeresspiegel mit einer maximalen Höhendifferenz von 21 m. Zum Stichtag 01.01.2020 lebten in Hechenwang 414 Menschen¹⁷ in überwiegend kleinen Wohneinheiten (Einfamilien- und Doppelhäuser). In der Gesamtgemeinde Windach lebten zum Stichtag 31.03.2023 3.858 Personen

16 <https://www.duden.de/rechtschreibung/Modell> (zug. am 26.08.2023)

17 <https://windach.de/ortsteile/> (zug. am 02.06.2023)

(Bayerisches Landesamt für Statistik, 2023). Somit leben ca. 10,7 % der Windacher Bevölkerung im Ortsteil Hechenwang. Der Ortsteil ist durch dörfliche Mischbebauung hauptsächlich landwirtschaftlich geprägt. Die landwirtschaftlich genutzten Böden im Gemeindegebiet Windach bei Hechenwang bestehen überwiegend aus Braunerde mit Anteilen an Lehm und Kies.¹⁸ Die typische natürliche Waldform ist der Waldmeister-Buchenwald und entlang der Windach kommen noch Schlucht- und Hangmischwälder und besonders schützenswerte Weichholzauwälder mit Erle, Esche, Weide vor,¹⁹ wobei Fichtenreinkulturen im forstwirtschaftlich genutzten Wald noch überwiegend anzutreffen sind.²⁰ Hechenwang liegt ca. 10 km vom Bahnhof Geltendorf und 6 km von der Bundesautobahn A 96 (München - Lindau) entfernt. Dadurch und den hohen kulturellen und Freizeitwert (Nähe München, Augsburg, Ammersee und Alpen) ist der Ort auch für Pendler innerhalb der Metropolregion München als Wohnort von Interesse.

Leistung in kW	Öl	Erdgas	Flüssiggas	Summe fossil	Scheitholz	Pellets	Hackschnitzel	Summe Biomasse
4 - 11	12	0	0	12	0	30	0	30
11 - 25	863	7	16	886	16	149	2	167
25 - 50	457	2	4	463	13	13	4	30
50 - 100	76	1	0	77	0	8	2	10
> 100	37	2	1	40	0	5	2	7

Tabelle 1: Daten aus dem Jahr 2021 zur Anzahl der Zentralheizungsfeuerstätten aus dem Kkehrbuch des Kkehrbezirks Schondorf. Erhoben und zur Verfügung gestellt durch die Klimaschutzstelle des Landkreis Landsberg am Lech.

Im Kkehrbezirk Schondorf, zu dem neben Utting auch der betrachtete Windacher Ortsteil Hechenwang gehören, gibt es nach Kkehrbuchdaten, die das Landratsamt Landsberg am Lech für das Jahr 2021 im Rahmen einer THG-Bilanzierung erhob (siehe Tabelle 1) insgesamt 1.722 Zentralheizungsfeuerstätten. Davon werden 1.478 Zentralheizungsfeuerstätten mit fossilen flüssigen und gasförmigen Brennstoffen (Öl, Erdgas, Flüssiggas) betrieben. Demgegenüber stehen insgesamt 244 Zentralheizungsfeuerstätten, die mit biogenen Festbrennstoffen (Scheitholz, Pellets, Hackschnitzel) betrieben werden. Somit wurden im betrachteten Zeitraum 85,8 % der Haushalte mit

18 Bayernatlas, <https://geoportal.bayern.de/bayernatlas/> (zug. 26.06.2023)

19 Managementplan der Regierung von Oberbayern zum FFH-Gebiet 7932-371 „Windach“; https://www.regierung.oberbayern.bayern.de/service/themen_umwelt/natura2000_mpl-entwuerfe/windach/index.html (zug. am 24.08.2023)

20 Persönliche Mitteilung Helge Lindenmüller, Privatwaldbesitzer in Windach, 23.08.2023

Zentralheizung fossil beheizt. Es besteht in der Region also ein großes Potenzial zur Dekarbonisierung des Wärmebedarfs im Gebäudesektor. Der größte Anteil in beiden Kategorien mit 1.053 Zentralheizungsfeuerstätten (61,1 %) findet sich in der Leistungsklasse 11 - 25 kW, was sich überwiegend auf Einfamilienhäuser aufteilen sollte. Eine genauere Auflistung unterteilt nach den einzelnen Orten im Kehrbezirk liegt dem Landratsamt nicht vor, so dass hier davon ausgegangen werden muss, dass die relativen Verhältnisse in Hechenwang entsprechend sind.

	Referenz 1971 - 2000	RCP 2.6 (2085)	RCP 8.5 (2085)
Jahresmitteltemperatur [°C]	8,2	+1,1 (+1,6)	+3,9 (+4,8)
Mittlere Sommertemperatur [°C]	16,6	+1,1 (+2,1)	+3,9 (+5,5)
Anzahl Hitzetage	4		+24 (+37)
Anzahl Tropennächte (> 20 °C)	0		+7 (+20)
Mittlere Wintertemperatur [°C]	-0,3	+1,4 (+1,5)	+4,1 (+5,0)
Anzahl Eistage	29		-23 (-27)
Anzahl Starkregentage	2,5		+1,2 (+2,4)

Tabelle 2: Änderung von verschiedenen Klimadaten für das Südbayerische Hügelland nach zwei verschiedenen Klimaszenarien. Angegeben als Median, obere Grenze der Bandbreite der Simulation in Klammern. (Werte aus Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 2021a)

Der Landkreis Landsberg am Lech liegt in der Klimaregion „Südbayerisches Hügelland“ (Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 2021b) im westlichen oberbayerischen Voralpenland. Auch im Südbayerischen Hügelland zeigen sich erste Auswirkungen des Klimawandels, welche nachfolgend kurz zusammengefasst werden sollen (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2021a). So ist beispielsweise die Jahresmitteltemperatur im Zeitraum von 1951 bis 2019 um 2,0 °C angestiegen und es zeigt sich im selben Zeitraum eine Verschiebung der Niederschläge hin zu vermehrtem Starkregen im Frühjahr (+29 %) und trockeneren Sommern (-13 % Niederschlag) (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2021a). Neben den bereits messbaren Veränderungen im Klima, ergeben Simulationen für die Zukunft abhängig von Szenarien mit schwachem (RCP 2.6) oder starkem (RCP 8.5) Klimaschutz (IPCC, 2014)

mehr oder weniger starke Änderungen in Bezug zum Referenzzeitraum, der im Zeitraum 1971 bis 2000 festgelegt ist (siehe Tabelle 2). Mittlere Temperaturen werden über das gesamte Jahr, ebenso wie die Anzahl von Hitzetagen ($> 30\text{ °C}$) und Tropennächten ($\geq 20\text{ °C}$) steigen. Die Anzahl der Eistage im Winter wird deutlich abnehmen, so dass vereinzelt sogar von vollständig frostfreien Wintern in Südbayern bis zum Ende des 21. Jahrhunderts ausgegangen werden muss.

Am Ort Hechenwang befinden sich eine Biogasanlage, eine Gärtnerei mit ganzjährig nachts und im Winter ganztags beheizten Gewächshäusern²¹ und eine Zimmerei mit Verwaltungsgebäuden, beheizten Fertigungshallen und eigenen Wohngebäuden²², die sich v. a. auf Bestandssanierung und den Bau von Ein- und Mehrfamilienhäusern in Holzständerbauweise spezialisiert hat. In der Zimmerei fällt regelmäßig Abfallholz und Verschnitt an, welche dort seit Jahren zu Hackschnitzeln verarbeitet und zur weiteren thermischen Nutzung eigener Liegenschaften (Beheizung von Wohn-, Bürogebäuden und Fertigungshallen) verwendet werden.

In Hechenwang soll ein Wärmenetz zur fossilfreien Wärmeversorgung des Ortes realisiert werden. Eine erste Abfrage im Dorf samt Kostenschätzung im Jahr 2022 durch den Dienstleister ENERPIPE GmbH²³ ergab, dass sich in einer ersten Ausbaustufe ca. 30 Wärmeabnahmeanschlüsse für das Wärmenetz realisieren ließen. Dabei konnte eine benötigte Trassenlänge, der im Boden neu zu verlegenden Wärmeleitungen von ca. 2.500 m ermittelt werden. Die Haupttrasse verläuft entlang der Durchgangsstraßen auf einer Länge von ca. 1.700 m. Von dort aus zweigen vier Nebenleitungen und einzelne Hausanschlussleitungen ab.²⁴ Aufgrund der Trassenlänge und der Anzahl der Anschlussnehmer, kann hier von einem Nahwärmenetz gesprochen werden (Weidlich, 2020). Es soll eine Mischung aus Alt- und Neubauten versorgt werden. Die Gärtnerei wird bereits durch die Biogasanlage über eine kurze Wärmeleitung mit Abwärme des Kraft-Wärme-Kopplungs-Blockheizkraftwerks mit Wärme versorgt. Die Zimmerei im Südosten des Ortes beabsichtigt eine Erweiterung der Fertigung und Bürogebäude und erwägt ebenfalls eine Anbindung an das Nahwärmenetz und würde einen Teil des benötigten Brennstoffs in Form von Hackschnitzeln aus der Holzverarbeitung in den

21 <https://gaertnerei-dumbsky.de/> (zug. am 14.07.2023)

22 <https://holzbau-fichtl.de/> (zug. am 07.06.2023)

23 <https://www.enerpipe.de/> (zug. am 04.06.2023)

24 Aussage ENERPIPE bei einer Gemeinderatssitzung in Windach im November 2022.

Prozess einbringen, wobei die potenzielle Menge aktuell nicht genau ermittelbar ist.²⁵ Der Dienstleister ENERPIPE GmbH berechnete in seiner ersten Kostenschätzung die Projektkosten anhand eines Hackschnitzelheizkessels mit einer thermischen Leistung von 600 kW.²⁶

4.2 Wärmebedarf vs. Wärmepotential

Aus den Daten der zuvor genannten Abfrage in Hechenwang resultierte ein Wärmebedarf von ungefähr 1,2 GWh/a für die genannten 30 Hausanschlüsse. Der Wärmebedarf beinhaltet dabei angenommene 19 % Wärmeverluste bei der Wärmeerzeugung und in den Leitungen des Netzes. Als Energieträger wird für den Vergleich mit Holzhackschnitzeln gerechnet. Somit ergibt sich für das zu planende Nahwärmenetz eine Wärmeabnahme von 504 kWh pro laufendem Meter Trasse. Nach Aussage von Marco Ohme (Leitung Projekt & Engineering Center - Viessmann Group) ist ab 500 kWh/m eine Umsetzbarkeit in einem klassisch beheizten Nahwärmenetz betriebswirtschaftlich gut darstellbar.²⁷

Holzhackschnitzel sind ein biologisches Produkt. Die Eigenschaften, wie z. B. der Heizwert, variieren. Der Heizwert hängt dabei von der relativen Feuchte im Material und dem Ausgangsrohstoff ab. Verschiedene Laub- und Nadelhölzer besitzen unterschiedliche Werte. In der weiteren Betrachtung wird daher ein gemittelter Wert für die Heizleistung von 4 kWh pro kg Hackschnitzel bei einer Restfeuchte von 15 bis 20 % angenommen (Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), 2014).

Der geforderte Wärmebedarf lässt sich über den Jahresverlauf mit einem Hackschnitzelheizkessel mit einer thermischen Leistung von 600 kW, wie von ENERPIPE GmbH geplant, bereitstellen. Die gleiche Menge könnte auch durch einen entsprechend dimensionierten Pyrolysator abgedeckt werden. Von einem möglichen Hersteller, der Biomacon GmbH, wurde auf Nachfrage für den infrage kommenden Wärmebedarf das Modell Biomacon C160-F²⁸ genannt (siehe Anhang).

25 Persönliche Auskunft des Energieberaters der Zimmerei, Herrn Arlt, am 01.06.2023

26 Aussage ENERPIPE bei einer Gemeinderatssitzung in Windach im November 2022.

27 Aussage Marco Ohme, Viessmann (Webinar Kommunale Wärmeplanung - Das Quartier als Lösung: Bewährte Technologien bei Quartiersprojekten, ODH, 15.06.2023, <https://opendistricthub.de/webseminar-reihe-kommunale-waermeplanung-das-quartier-als-loesung/>) (zug. am 20.07.2023)

28 https://www.biomacon.com/files/ugd/7072b5_1fe5da25cedb4f928ad10872564cdd48.pdf (technisches Datenblatt, zug. am 21.06.2023)

Der empfohlene Pyrolyikator benötigt gemäß Herstellerangabe für die Produktion der geforderten Wärmemenge von 1,2 GWh/a ca. 750 t Hackschnitzel mit einer Restfeuchte von 20 %. Gleichzeitig entstehen laut Aussage des Herstellers beim Pyrolyseprozess ca. 187 t verwertbare Pflanzenkohle (siehe Anhang).

Im Gegensatz zum Pyrolyikator benötigt ein handelsüblicher Hackschnitzelkessel mit einem Wirkungsgrad von typischerweise $\eta = 90 \%$ ²⁹ eine Masse von 333 t Hackschnitzel um die Wärmemenge von 1,2 GWh zu erzeugen.

$$\begin{aligned} m_{\text{Hackschnitzel}} &= (\text{Wärmebedarf}_{\text{Wärmenetz}} / \eta_{\text{Heizkessel}}) / \text{Heizwert}_{\text{Hackschnitzel}} \\ &= (1,2 * 10^6 \text{ kWh} / 0,9) / 4 \text{ kWh/kg} \\ &\underline{\underline{= 333 \text{ t}}} \end{aligned}$$

Bei der Verbrennung von 1 TJ (Terajoule) Holz wird eine Masse von 107,8 t CO₂ (UBA, 2022b) in die Atmosphäre emittiert. Beim berechneten Hackschnitzelheizkessel und dem angenommenen Wärmebedarf von 1,2 GWh p. a. entstehen somit 517 t jährlicher CO₂-Emissionen.

$$\begin{aligned} m_{\text{CO}_2\text{e}} &= \text{Wärmebedarf}_{\text{Wärmenetz}} / \eta_{\text{Heizkessel}} * 3,6 \text{ TJ/GWh}^{30} * 107,8 \text{ t/TJ} \\ &= 1,2 \text{ GWh} / 0,9 * 3,6 \text{ TJ/GWh} * 107,8 \text{ t/TJ} \\ &\underline{\underline{= 517 \text{ t}}} \end{aligned}$$

Diese 517 t CO₂ wurden zuvor im Laufe mehrerer Jahre durch Bäume aus der Atmosphäre aufgenommen. Daher gilt die thermische Verwertung von Biomasse als THG-neutral. Das emittierte CO₂ müsste allerdings eingefangen und gebunden werden, um als BECCS-Technologie einen positiven Effekt auf den anthropogenen Treibhauseffekt als NET zu haben. Da die Pyrolyse nahezu unter Sauerstoffabschluss stattfindet, entstehen beim Pyrolyseprozess im Vergleich dazu keine direkten CO₂-Emissionen.

187 t nutzbare Biokohle entstehen beim Umsatz von 750 t Hackschnitzeln im Jahr mit dem Pyrolyikator. Dadurch kann eine Masse von $187 \text{ t} * 3,6 * 0,8 = \underline{\underline{538,56 \text{ t}}}$ CO₂ jährlich aus der Atmosphäre permanent gebunden werden. Der Faktor 3,6 ergibt sich bei Betrachtung der molaren Massen von Kohlenstoff, Sauerstoff und CO₂. Ein kg

29 <https://www.energie-fachberater.de/heizung-lueftung/heizung/hackschnitzelheizung/> (zug. am 11.07.2023)

30 1 GWh = 3,6 TJ

Kohlenstoff ist in 3,6 kg CO₂ chemisch gebunden. Der Faktor 0,8 ergibt sich durch angenommene Verluste.³¹ Dadurch liegt hier durch PyCCS eine NET vor, die der Atmosphäre permanent THGs entnehmen kann.

Im direkten Vergleich zwischen beiden Heizlösungen benötigt der Pyrolysator die 2,25-fache Menge an Brennstoff. In der jährlichen CO₂-Bilanz schneidet der Pyrolysator um über 1.055 t CO₂ besser ab als der Hackschnitzelkessel.

Betrachtet man im Vergleich den Gesamtwärmebedarf der gesamten Gemeinde Windach inklusive aller Ortsteile, werden jährlich 41.167 MWh Wärmeenergie benötigt.³² Dies ist mehr als die 34fache Menge im Vergleich zum Wärmebedarf des Nahwärmenetzes Hechenwang.

4.3 Verfügbarkeit und Qualität der eingesetzten Biomasse

Um die zuvor beschriebenen, potenziell negativen Begleiterscheinungen der energetischen Nutzung von Biomasse nicht im vorgestellten System wiederzufinden, sollte es sich beim eingesetzten Rohstoff um möglichst lokale Biomasse, die in Form von unbehandelten Reststoffen verfügbar ist, handeln. Dies dient dazu, dass durch den Anbau und die Ernte der Biomasse keine Konkurrenz zu landwirtschaftlicher Lebensmittelproduktion in Form von verschiedensten Landnutzungsänderungen entsteht. Als potenzielle Ausgangsrohstoffe finden sich im Gemeindegebiet Windach Holzhackschnitzel, Grünschnitt oder auch Reststoffe aus forstwirtschaftlichen Wald- und Baumpflegeaktivitäten.

Als eine Quelle für Hackschnitzel bietet sich, wie bereits beschrieben, die Zimmerei Fichtl vor Ort an. Ein Gespräch mit dem Energieberater der Zimmerei ergab,³³ dass die momentan genutzten Hackschnitzel aus eigenem Restholz zur thermischen Verwertung zur Verfügung stehen. Das in der Zimmerei verwendete Holz kommt nach eigener Aussage aus der Region mit einem maximalen Umkreis von 200 km. Zur Zeit wird am Standort der Zimmerei ein älterer Hackschnitzelheizkessel (Baujahr 1999, 300 kW) zur eigenen Wärmeversorgung betrieben. Der regelmäßige manuelle Wartungs- und Reinigungsaufwand für den Kessel wird als sehr hoch angegeben. Zur

31 https://www.biomacon.com/files/ugd/7072b5_1fe5da25cedb4f928ad10872564cdd48.pdf (zug. am 11.07.2022)

32 Energieatlas Bayern, <https://www.karten.energieatlas.bayern.de/> (zug. 24.08.2023)

33 Persönliche Auskunft des Energieberaters der Zimmerei, Herrn Arlt, am 01.06.2023

Wärmeversorgung müssen maximal 5 m³ Hackschnitzel pro Jahr auf dem freien Markt zugekauft werden, was einer Masse von ca. 1 t entspricht.³⁴ Ein weiteres betriebliches Monitoring über den Wärmebedarf und Hackschnitzelverbrauch am Standort liegt mangels Notwendigkeit nicht vor.

Der Bauhof der Gemeinde Windach entsorgt jährlich große Mengen an Biomasse in Form von Grünschnitt aus Pflegemaßnahmen im Gemeindegebiet. Es wurde im Jahr 2022 ein Volumen 476,6 m³ davon entsorgt, wofür 1.674,87 € an einen Dienstleister gezahlt werden mussten.³⁵ 476,6 m³ Grünschnitt entsprechen 190,6 t Biomasse.³⁶ Diese Biomasse könnte auch in einem Pyrolyseprozess innerhalb der Gemeinde verwertet und dabei zusätzlich die Entsorgungskosten eingespart werden. Zusätzlich entsorgt die Gemeinde regelmäßig Restholz aus Baumpflege- und Baumschnittmaßnahmen unentgeltlich über einen weiteren Dienstleister, welcher damit Hackschnitzel zur eigenen thermischen Verwertung herstellt. Über die anfallende Menge des Restholzes wird nicht Buch geführt.³⁷ Daher kann über das kommunale Restholzpotenzial in dieser Arbeit keine weitere Aussage getroffen werden.

Der hier betrachtete Pyrolysator von Biomacon GmbH eignet sich lediglich für Holzhackschnitzel. Zur Verwertung anderer Biomasse, wie sie z. B. in der Gärtnerei und der Gemeinde anfällt, müsste ein alternatives Produkt eines anderen Herstellers untersucht werden.

Betrachtet man den lokalen Wald als Lieferanten der regenerativen Energiequelle Holz, ist zu beobachten, dass die Biomasseproduktion in bayerischen Forsten zunimmt. Der verstärkte Zuwachs an Biomasse in Form von Holz ist aktuell deutlich ersichtlich an der größer werdenden Dicke der Jahresringe. Grund dafür ist auf der einen Seite die Abnahme des sauren Regens, was zu verbesserter Wurzelgesundheit der Bäume führt. Auf der anderen Seite werden die erhöhten atmosphärischen CO₂-Werte als wachstumsfördernd angenommen. Regelmäßig steht einiges an Holzresten im Forst zur Verfügung, die sich fast ausschließlich für die thermische Verwertung in Form von Hackschnitzeln eignen. Waldbesitzer müssen aufgrund der Verkehrssicherungspflicht

34 Gemittelte Masse eines Schüttraumeters \approx 200 kg;
<https://www.hackschnitzel-preisanfrage.de/seite/hackschnitzel-masseinheit-und-gewicht/> (zug. am 14.07.2023)

35 Information bereitgestellt durch das Baumamt der Gemeinde Windach am 20.07.2023

36 1 m³ Grünschnitt besitzt eine Masse von 0,4 t. Quelle:
<https://www.abfallscout.de/umrechnungsfaktor-gruenschnitt-gewicht> (zug. am 10.08.2023)

37 Persönliche Mitteilung des Bauhofleiters der Gemeinde Windach vom 24.07.2023

die Waldwege risikofrei halten und Bruchholz oder über Wege überhängende, vom Bruch gefährdete Stämme, Äste und Zweige entfernen. Ferner fällt regelmäßig Kalamitätsholz durch Sturmschäden, Parasitenbefall oder Krankheiten an. Weitere typische Gründe für Bruch sind Windwurf oder hohe Schneelast durch schweren Schnee v. a. im Frühjahr (Stimm et al., 2022). Überschlagsweise kann von einem entnehmbaren Biomassezuwachs in Höhe von ca. 9 - 11 m³ pro Hektar und Jahr im deutschen Wald ausgegangen werden.³⁸ Die Gemeinde Windach ist selbst Waldbesitzer und verfügt auf einem Gemeindegebiet über 14 Flurstücke mit insgesamt 13,9 ha Wald. Im Gemeindegebiet der Nachbargemeinde Penzing gehören der Gemeinde Windach vier Waldgrundstücke mit einer Fläche von insgesamt 3,6 ha.³⁹ Aus den 17,5 ha kommunaler Waldfläche ließen sich somit jährlich zwischen 157,5 - 192,5 m³ hölzerne Biomasse durch reinen Zuwachs erwirtschaften. Laut Daten aus dem Bayernatlas steht im gesamten Gemeindebereich von Windach (kommunaler, staatlicher und privater Wald) ein Energiepotenzial aus Waldderbholz in Höhe von 10 GJ pro Hektar und 1,7 GJ pro Hektar aus Flur- und Siedlungsholz zur Verfügung.⁴⁰ Dies entspricht einem Gesamtenergiepotenzial von 3,25 MWh.⁴¹ Die Gemeinde Windach erstreckt sich über 2.484 ha.⁴² Damit sind 8.073 MWh p. a. an Wärmebedarf durch hölzerne Bioestmasse aus den Waldflächen des Gemeindegebiets potenziell abdeckbar.

Zu beachten wäre, dass die in diesem Kapitel angesprochene Biomasse (v. a. Grünschnitt) vor einer thermischen Verwertung noch einen Trocknungsprozess durchlaufen müsste, um die Restfeuchte (aber auch die Masse) zu reduzieren. Dies könnte auch mittels der Abwärme aus einem Pyrolyseator beschleunigt werden und ist in Referenzanlagen durchaus in der Praxis erprobt.⁴³

4.4 Kostenkalkulation im Vergleich mit herkömmlichen Biomasseheizkesseln

Vergleicht man die beiden Lösungen Hackschnitzelheizkessel und Pyrolyseator anhand ihrer Kosten, sind die nötigen externen Infrastrukturen und folglich auch die resultierenden Kosten für das Wärmenetz mit Pumpen und Hydraulik, der Leittechnik,

38 <https://basisdaten.fnr.de/land-und-forstwirtschaft/holz> (zug. am 04.09.2023)

39 Information bereitgestellt durch das Baumamt der Gemeinde Windach am 18.09.2023

40 Bayernatlas, <https://geoportal.bayern.de/bayernatlas/> (zug. 24.08.2023)

41 1 GWh = 3,6 TJ

42 <https://windach.de/daten-und-geschichte/> (zug. am 24.08.2023)

43 <https://www.zvfrohnbach.de/wissenswertes/zentrales-klaerwerk/> (zug. am 04.07.2023)

der Wärmeübergabestationen an den jeweiligen Wärmeabnahmestellen und einen benötigten zentralen Nahwärmepufferspeicher identisch. Daher wird auf diese Kosten nicht weiter eingegangen. Es werden nachfolgend nur Posten betrachtet, bei denen Kostenunterschiede bestehen.

Unterschiede bei den Kosten entstehen beim Bau der unterschiedlichen Heizzentralen für Pyrolysator und Hackschnitzelheizung und beim laufenden Betrieb durch unterschiedliche Mengen an Betriebsstoffen.

Für die konventionelle Hackschnitzelheizung inklusive dem Bau der Heizzentrale ist in der ersten Kostenschätzung von ENERPIPE GmbH eine Summe von 460.978 € veranschlagt.⁴⁴

Aktuell lassen sich Aufwendungen für fossilfrei geplante und installierte Wärmenetze mittels einer Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW)⁴⁵ mit 40 % durch das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) bezuschussen. Darin enthalten ist auch die vollständige fossilfreie Wärmeerzeugungstechnik. Im vorgestellten Fall ist der Hackschnitzelheizkessel für nachwachsende Brennstoffe damit ohne Einschränkung förderfähig. Teilweise gibt es auch eine Betriebskostenförderung für den nötigen Strombedarf beim Einsatz von Wärmepumpen oder Solarthermieanlagen für die Wärmeerzeugung.

Entstehende Kosten für die jeweilige Hausanschlusstechnik der einzelnen Anschlussnehmer sind ebenfalls durch eine Förderung des BAFA als Einzelmaßnahmen bezuschussbar. Hierbei handelt es sich um die Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG).⁴⁶ Die Förderhöhe für einen Wärmenetzanschluss mit direkten Anschlussleitungen am eigenen Grundstück und Gebäude, Steuerungstechnik, Wärmespeicher und Wärmeübergabestation beträgt 30 % plus 10 %, falls eine bestehende fossile Heizung dafür stillgelegt wird (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2022). Übliche Kosten für solch einen kompletten Hausanschluss liegt vor Förderung bei ca. 10.000 €⁴⁷, welche von den einzelnen Hausbesitzern zu tragen sind.

44 Aussage ENERPIPE bei einer Gemeinderatssitzung in Windach im November 2022.

45 https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Waermenetze/Effiziente_Waermenetze/effiziente_waermenetze_node.html (zug. am 05.06.2023)

46 https://www.bafa.de/DE/Energie/Effiziente_Gebaeude/Foerderprogramm_im_Ueberblick/foerderprogramm_im_ueberblick_node.html (zug. am 05.06.2023)

47 Aussage ENERPIPE bei einer Gemeinderatssitzung in Windach im November 2022.

Pyrolysatoren werden dagegen zur Zeit nicht als Wärmeerzeugungsanlagen angesehen, sondern dienen in erster Linie der Produktion von Pflanzenkohle. Sie sind daher von den oben genannten Bundesförderungen ausgenommen. Im Freistaat Bayern ist auch keine umfangreiche landesspezifische Förderung für diese Technik vorgesehen (siehe Anhang und Aussage C.A.R.M.E.N. e. V.⁴⁸). Als Begründung wird angegeben, dass für die Förderung als Wärmeerzeugungsanlagen aktuell bestimmte thermische Wirkungsgrade erreicht werden müssten. Diese sind bei der Pyrolyse prozessbedingt nicht darstellbar, da ein großer Anteil der in den Prozess eingebrachten Energie noch stofflich, chemisch in der Pflanzenkohle gebunden ist.⁴⁹ Seit September 2023 beabsichtigt das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF) in einem ersten Schritt sechs Pyrolyse-Demonstrationsanlagen in drei verschiedenen Leistungskategorien zur Herstellung von Pflanzenkohle im Freistaat zu fördern. Die Vergabe erfolgt nach Windhundverfahren. Die Förderung beläuft sich dabei auf 50 % bei einer Deckelung von 200.000 € pro Anlage.⁵⁰ Durch die Begrenzung auf insgesamt nur sechs Pyrolyseanlagen (je zwei pro Kategorie), die Kurzfristigkeit, die strengen Vorgaben zur Umsetzung (z. B. konkrete Ausformulierung der THG-Zertifizierung) und den Modellcharakter kann diese potenzielle Förderung in der vorliegenden Arbeit nicht weiter berücksichtigt werden.

Der Hackschnitzelheizkessel kommt damit nach Förderung von 40 % auf eine Investitionssumme von 276.586,80 €. Der unter aktuellen Bedingungen (Stand August 2023) nicht förderbare Pyrolysator wird in der Investition mit 468.000 € veranschlagt (siehe Anhang). Somit entsteht beim Vergleich der beiden Technologien eine Differenz in den Investitionskosten von 191.413,20 € zugunsten des Hackschnitzelheizkessels.

Bei den laufenden Kosten müssen die unterschiedlichen Brennstoffkosten verglichen werden. Personalkosten für Verwaltung, die Aufrechterhaltung des Betriebs und Wartung o. ä., welche bei beiden Technologien als identisch anzusehen sind, werden im direkten Vergleich nicht einkalkuliert. Wie zuvor beschrieben, benötigt der Pyrolysator die 2,25-fache Menge Brennstoff im Vergleich zum Hackschnitzelheizkessel. Das langjährige Mittel von Hackschnitzelpreisen lag vor dem russischen Einmarsch in die

48 Webinar 21.07.2023: Teil 3: „Multitalent Bioraffinerie – Fokus Pflanzenkohle“ (https://www.carmen-ev.de/wp-content/uploads/2023/04/Flyer_Multitalent-Bioraffinerie.pdf) (zug. am 24.07.2023)

49 Ebd.

50 <https://www.tfz.bayern.de/foerderung/334108/index.php> (zug. am 10.08.2023)

Ukraine im Februar 2022 seit 2008 beständig um 125 € pro Tonne.⁵¹ Nach einem zwischenzeitlichen Hoch von 175,86 € im vierten Quartal 2022 sinkt der Preis inzwischen wieder auf 152,36 € im zweiten Quartal 2023. Für das Modell wird mit den gemittelten 125 € pro Tonne gerechnet.

Beim Hackschnitzelkessel entstünden jährliche Brennstoffkosten in Höhe von

$$333 \text{ t} * 125 \text{ €/t} = \underline{41.625 \text{ €}}.$$

Beim Pyrolyзатор entstünden jährliche Brennstoffkosten in Höhe von

$$750 \text{ t} * 125 \text{ €/t} = \underline{93.750 \text{ €}}.$$

Somit entsteht beim Vergleich der beiden Technologien eine Differenz in den jährlich laufenden Betriebskosten von 52.125 € zugunsten des Hackschnitzelheizkessels.

In Tabelle 3 sind die Kosten zusammenfassend aufbereitet.

	Investitionskosten [€]	Kosten Betriebsstoffe p. a. [€]
Hackschnitzelheizkessel	276.586,80	41.625,00
Pyrolyзатор	468.000,00	93.750,00
Differenz	191.413,20	52.125,00

Tabelle 3: Kostenvergleich beider Heizlösungen in Bezug auf Investition und Betriebskosten.

Bei dieser Betrachtung kann ein Pyrolyзатор im Laufe seiner Betriebszeit nie ökonomisch mit einem entsprechend dimensionierten Hackschnitzelheizkessel konkurrieren. Die Anschaffungskosten und der Betrieb des Pyrolyzators sind beide teurer.

Ein entsprechend geeigneter Pyrolyзатор böte allerdings zusätzlich die Möglichkeit, die jährlichen Entsorgungskosten des gemeindlichen Grünschnitts in Höhe von 1.674,87 € einzusparen. Dies entspricht allerdings lediglich 3 % der Betriebskostendifferenz zwischen beiden Technologien im betrachteten Modellwärmenetz.

Das Bayerische Klimaschutzgesetz (BayKlimaG) vom 01.01.2023⁵² verpflichtet öffentliche Verwaltungen der Staatsregierung bis 2028 klimaneutral zu sein (Art. 3 (1)). Verbleibende THG-Restemissionen sollen kompensiert werden (Art. 4 (1)). Kommunale

51 20 % Restfeuchte <https://www.carmen-ev.de/service/marktueberblick/marktpreise-energieholz/marktpreise-hackschnitzel/> (zug. am 14.07.2023)

52 <https://www.gesetze-bayern.de/Content/Document/BayKlimaG/true> (zug. am 21.07.2023)

Verwaltungen sollen dabei ebenso verfahren. Durch einen Betrieb eines Pyrolysatoren auf dem eigenen Gemeindegebiet mit eigener Biomasse ergibt sich für Kommunen die Möglichkeit, zertifizierbare Negativemissionen selbst zu generieren. Die öffentliche Verwaltung der Gemeinde Windach kommt nach einer ersten Analyse der THG-Emissionen der Verwaltung auf eine Summe von mindestens 447,87 t CO₂eq.⁵³ Der untersuchte Pyrolysatoren könnte in dem verhältnismäßig kleinen Nahwärmeprojekt CO₂-Zertifikate über 538,56 t generieren. So könnte ein Anteil von 120 % lokal und innerhalb der Gemeindegrenzen mehr als nur kompensiert werden. Die öffentliche Hand kann dabei finanziell deutlich entlastet werden. Dies geschieht durch die Reduktion an zuzukaufenden CO₂-Zertifikaten, welche zur Kompensation der unvermeidbaren THG-Emissionen der Gemeinde ab 2028 nötig werden, falls diese bis dahin durch verschiedene Effizienz- und Suffizienzmaßnahmen nicht weiter reduziert werden können. Bis zum Jahr 2030 werden durch unterschiedliche Organisationen Kosten in Höhe von ca. 100 € (WWF, 2023) bis über 200 € (MCC, 2023) pro Tonne CO₂ erwartet. Eine jährliche Einsparung für den Gemeindehaushalt bei vollständiger Kompensation der eigenen THG-Emissionen in Höhe von bis zu knapp 90.000 €⁵⁴ wäre daher zu erwarten. Die Projektierung eines durch einen Pyrolysatoren fossilfrei betriebenen Wärmenetzes in kommunaler Hand mit tatsächlicher Umsetzung erscheint daher ab sofort ökologisch und künftig auch ökonomisch empfehlenswert. Durch die Einbeziehung von möglichen jährlichen CO₂-Zertifikaten in Höhe von knapp 90.000 € wäre eine Amortisation der zuvor ermittelten höheren Kosten des Pyrolysatoren verglichen mit dem Hackschnitzelheizkessel innerhalb von ca. 5 Jahren möglich (siehe Abbildung 2).

53 Erste THG-Analyse des Energie- und Klimamanagements der Gemeinde für das Jahr 2022 (bisher unveröffentlicht, noch ohne Reise, Arbeitsweg und Müllentsorgung).

54 $447,87 \text{ t} * 200 \text{ €/t} = 89.574 \text{ €}$

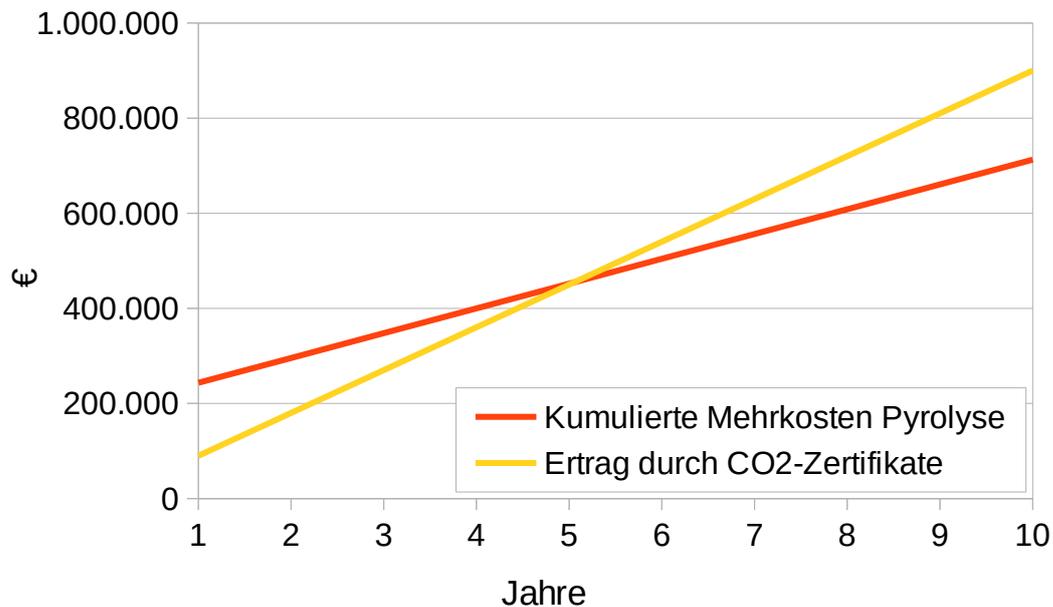


Abbildung 1: Break-Even der Pyrolyse im Vgl. zum Hackschnitzelheizkessel bei Berücksichtigung von CO₂-Zertifikaten in Höhe von 200 €/t. Eigene Abbildung.

Ein weiterer Ansatz, um auf der Kostenseite kompetitiver werden zu können und den Break-Even schneller erreichen zu können, wäre auf der Seite der Brennstoffkosten. Bei der Pyrolyse sind bei der Betrachtung von Holz hackschnitzeln die Brennstoffkosten durch den größeren Bedarf an Brennstoff im Modell höher als beim Holz hackschnitzelkessel. Substituiert man zuzukaufende Hackschnitzel für den Pyrolysatoren durch die Verwertung des gemeindeeigenen Restholzes, findet sich dadurch bei der Pyrolyse ein höherer Einspareffekt im Vergleich zum Hackschnitzelheizkessel. Die Verwendung eines alternativen Pyrolysatoren, der mit kommunalem Grünschnitt, Gülle von landwirtschaftlichen Betrieben aus der Region oder Klärschlamm betrieben werden könnte, ergäben sich nochmals günstigere fiskalische Parameter, die sich für den Betrieb eines Pyrolysatoren als fossilfreie Wärmequelle für eine Wärmenetz positiv auswirken sollten.

5 Bewertung der im Rahmen des Modells betrachteten Biomasseheiztechniken

Zunächst sollen die beiden im Modell vorgestellten Biomasseheiztechnologien grundsätzlich verglichen und bewertet werden. Anschließend wird die Pyrolyse, um die es in der grundsätzlichen Fragestellung ging, anhand ihrer Einflussnahme auf die Erfüllung einer im konkreten Modellbeispiel geeigneten Auswahl an Indikatoren der 17 SDGs betrachtet.

5.1 Grundsätzliche Bewertung

Durch den Einsatz regionaler, nachhaltig gewachsener biologischer Brennstoffe in Form von Holz(resten) aus heimischen Wäldern wird durch beide Technologien aus dem vorangegangenen Modellvergleich die lokale Wertschöpfung erhöht. Bei der Holzhackschnitzzellösung wird das Holz allerdings verbrannt und es entstehen lediglich Wärme und Abgase. Der atmosphärische Kohlenstoff, welcher durch die Bäume und Sträucher zuvor aufgenommen wurde, wird der Atmosphäre durch die Abgase in Form von CO₂ wieder umgehend zugeführt und es ist daher fraglich, ob eine THG-Neutralität bei der energetischen Biomassenutzung im Hackschnitzelkessel erreicht werden kann (Hennicke et al., 2020; DUH, 2021; Greenpeace, 2022). Beim Einsatz von Pyrolysatoren kann atmosphärischer Kohlenstoff in Form von Pflanzenkohle dauerhaft gebunden werden und das entsprechende THG-Potenzial von CO₂ wird dabei folglich aktiv der Atmosphäre entnommen. Pflanzenkohle als wertvoller Grundstoff für verschiedenste weitere Anwendungen wird zusätzlich erzeugt. Die oxidative Verbrennung im Holzhackschnitzelkessel kann daher bestenfalls als THG-neutral angesehen werden, was je nach Betrachtungsweise nicht zutrifft (DUH, 2021; Greenpeace, 2022). Die Pyrolyse ist im Gegensatz dazu eine echte NET, die sich Ökosystemleistungen zunutze macht. Die anthropogen erhöhten atmosphärischen CO₂-Werte, welche die Klimaerwärmung antreiben, sollten künftig reduziert werden, um weiteren negativen Effekten des Klimawandels entgegenzutreten. Einsatz von risikoarmen NETs ist daher aus Sicht des Klimaschutzes und aller drei Dimensionen der NE (Ökologie, Soziales, Ökonomie) erstrebenswert, was im Vergleich der beiden Technologien, die Pyrolyse und den beschriebenen Einsatz der gewonnenen Pflanzenkohle favorisiert.

Der lokale Einsatz von Pflanzenkohle in Böden der Region unterstützt zudem die Kreislaufwirtschaft, indem Fruchtbarkeit der Böden verbessert und landwirtschaftliche Erträge erhöht werden. Es handelt sich also v. a. um die Aufrechterhaltung eines Nährstoffkreislaufs mit erhöhtem Ertragspotenzial in Land- und Forstwirtschaft. Größere Mengen an resultierenden biogenen Reststoffen durch ertragreichere Bewirtschaftung können als Folge dessen wieder in Pyrolysatoren zur zentralen, fossilfreien Wärmegegewinnung und Pflanzenkohleproduktion eingesetzt werden.

Beim Einsatz von Pflanzenkohle ist nicht nur die Verbesserung von landwirtschaftlichen Böden, sondern auch die Möglichkeit, THG-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Flächen oder der Viehzucht zu reduzieren, zu bemerken. Dies geschieht durch potenziell geringere Mengen an benötigtem Mineraldünger und die Aufnahme- und Bindungsfähigkeit von Bestandteilen aus Gülle. Dadurch werden v. a. die Emissionen von Lachgas und Methan vermindert. Der möglicherweise verbesserte Aufbau von Humus entnimmt zusätzlich Kohlenstoff aus der Atmosphäre.

Der Einsatz von Biomasse in der lokalen Wärmeversorgung macht beim betrachteten Modell in Windach/Hechenwang durchaus Sinn. Die Gesamtgemeinde hat einen jährlichen Wärmebedarf in Höhe von 41.167 MWh⁵⁵. Wie in Kapitel 4.3 festgestellt wurde, sind 8.073 MWh p. a. an Wärmebedarf durch hölzerne Biorestmasse aus den Waldflächen des Gemeindegebiets potenziell abdeckbar. Verrechnet man dies noch mit einem realistischen Wirkungsgrad von $\eta = 90\%$ und 19 % Wärmeverlusten im Netz, ergibt sich ein jährliches Potenzial aus lokaler Biomasse in Höhe von 5.885 MWh, was knapp 15 % der benötigten Gesamtmenge des gemeindlichen Wärmeenergiebedarfs entspricht.

Aus diesen Gründen erscheint es sinnvoll, in einer ländlichen Gemeinde wie Windach auf Biomasse als nachhaltige und fossilfreie Energiequelle zu setzen. Pyrolyse ist dabei gegenüber der klassischen Holzhackschnitzzellösung vorzuziehen. Nachfolgend werden die Einflüsse der Pyrolysetechnologie auf die SDGs und somit der NE im ländlichen Raum Oberbayerns zusammengefasst.

55 Energie-Atlas Bayern: <https://www.karten.energieatlas.bayern.de/start/?c=650933,5325185&z=13&l=atkis&t=energie&comp=mischpult> (zug. am 02.10.2023)

5.2 Lokaler Einfluss auf SDG-Indikatoren

„Im Jahr 2015 verabschiedete die Weltgemeinschaft am 25.09. beim UN-Nachhaltigkeitsgipfel der Staats- und Regierungschefs in New York die Agenda 2030 mit den 17 SDGs (UN, 2015⁵⁶). Diese Ziele sind Handlungsempfehlungen auf allen politischen Ebenen mit klaren Indikatoren in ihren Unterzielen. Sie sollen bis 2030 erfüllt sein und dienen in ihrer Gesamtheit dem Wohlergehen und Wohlstand aller Menschen, dem Schutz des Erdökosystems, der Sicherung des Friedens und einer gestärkten internationalen Zusammenarbeit. Die SDGs lassen sich nach den 5 Ps eingruppiert: *People* (SDGs 1 - 6), *Prosperity* (SDGs 7 - 12), *Planet* (SDGs 13 - 15), *Peace* (SDG 16) und *Partnership* (SDG 17). Die drei Dimensionen nachhaltiger Entwicklung sollten bei jeder politischen Entscheidung (von lokal bis global) berücksichtigt werden. Die ökologische, soziale und ökonomische Komponente - keine darf vernachlässigt werden.“ (vgl. Gehr, 2024)

Das von den UN propagierte Motto „Think globally, act locally“⁵⁷ zeigt in vier Worten einfach und prägnant den potenziellen Einfluss, welches lokales Handeln auf die Erfüllung der Agenda 2030 über die Bearbeitung der SDG-Indikatoren (Riedel et al., 2022) und der Erfüllung der 17 SDGs hat.

Die Agenda 2030 beinhaltet fünf Prinzipien. Bezüglich der lokalen Einflussnahme ist das Prinzip der Partnerschaftlichkeit, welches in der Agenda 2030 festgehalten ist als wichtige Grundlage hervorzuheben. Die SDGs sollen in allen Handlungsebenen, also von kommunaler zu globaler Ebene und von zivilgesellschaftlicher über wissenschaftlicher zu wirtschaftlicher Ebene umgesetzt werden, woraus hervorgeht, dass alle genannten Ebenen eine Verantwortung für das erfolgreiche Erreichen der Ziele besitzen (Hauff, 2019).

5.2.1 Lokale SDG-Indikatoren im Vergleich zu globalen SDG-Indikatoren

Es ist für die folgenden Betrachtungen vorweg aus den bereits erwähnten fünf Prinzipien der Agenda 2030 festzustellen, dass die SDGs in ihrer Gesamtheit untrennbar mit einander verbunden sind und nur alle Ziele zusammen (Prinzip der Unteilbarkeit) und zwar mit Gültigkeit in allen Ländern (Prinzip der Universalität) und

56 Hier: UN, 2015b

57 <https://www.undp.org/blog/think-globally-act-locally> (zug. am 11.08.2023)

partnerschaftlich erreicht werden sollen. Ferner ist auf Transparenz bei der regelmäßigen, internationalen Berichterstattung (Prinzip der Rechenschaftspflicht) und darauf, Niemanden zurückzulassen, zu achten (Hauff, 2019).

Deutschland hat im Bezug auf die Erfüllung der 17 SDGs andere Herausforderungen als beispielsweise Länder des globalen Südens. Aktuell steht die Bundesrepublik Deutschland im UN Sustainability Report verhältnismäßig gut da. Es belegt den vierten Platz von 166 Ländern im SDG Index Rank mit einem Erfüllungsgrad des SDG Index Scores von 83,36 %. Vor Deutschland sind lediglich die drei skandinavischen Länder Finnland, Schweden, Dänemark angesiedelt. Im UN Sustainability Report wird für jedes Land detailliert jedes SDG-Unterziel analysiert. Dabei wird auch der historische Verlauf der Entwicklung der jeweiligen Erfüllungsgrade aufgezeigt (Sachs et al., 2023). Gleichzeitig gibt es noch den Indikatorenbericht zur nachhaltigen Entwicklung Deutschlands, welcher durch das Statistische Bundesamt (2023) bereitgestellt wird. Dabei wird übersichtlich auf bereits Erreichtes und noch zu lösende Herausforderungen hingewiesen. Über die nationale Ebene hinaus ist offensichtlich, dass auf kommunaler Ebene, je nach geographischer Region, die Erfüllung aller 17 SDGs und ihrer Unterziele durch die Gegebenheiten und rechtlichen Möglichkeiten vor Ort nicht möglich ist. Interkommunale und internationale Kooperationen und Austausch untereinander bringen die nachhaltige Entwicklung in Städten und ländlichen Gemeinden beständig vorwärts (Martens, 2017).

Die SDG-Indikatoren für Kommunen sind ein hilfreicher aber unverbindlicher Referenzrahmen, welcher den Fortschritt jeder Kommune bei der lokalen Erfüllung der SDGs und SDG-Unterziele anzeigt und der von Kommunen im Prozess der eigenen Bestrebungen in allen drei Nachhaltigkeitsdimensionen herangezogen werden kann. Sie wurden in der Vergangenheit durch eine breit aufgestellte Reihe an Akteuren, wie der Bertelsmann Stiftung, dem Deutschen Städtetag, dem Deutschen Städte- und Gemeindebund, dem Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, dem Europäischen Sekretariat von ICLEI, dem Deutschen Landkreistag und dem Deutschen Institut für Urbanistik (difu) erarbeitet und weiterentwickelt. Im Rahmen der eigenen Nachhaltigkeitsstrategie können Städte und Gemeinden aus der Vielzahl an beschriebenen SDG-Indikatoren ihre eigenen Schwerpunktmaßnahmen festlegen, auswerten und weitere Maßnahmen beschließen (Assmann et al., 2018; Riedel et al.,

2022). Der Stand des eigenen Erfüllungsgrads der SDG-Indikatoren, auch im Vergleich mit anderen Kommunen, ist über ein international ausgezeichnetes Internetportal abrufbar. Ideen und Anregungen zur Weiterentwicklung der eigenen Kommune im Rahmen der NE werden im Portal angeboten. Wichtig zur unkomplizierten Anwendbarkeit der SDG-Indikatoren ist auch, dass die verfügbaren Daten dafür zentral bereitgestellt und einfach digital abrufbar sind. Zu beachten ist, dass aus organisatorisch-logistischen Gründen die darunterliegende Datenbank nur Kommunen mit einer Bevölkerungszahl von mehr als 5.000 Menschen beinhaltet.⁵⁸ Daten der Gemeinde Windach mit ihrer Bevölkerungsanzahl von 3.858 Menschen sind daher in der Datenbank nicht verfügbar. Im Folgenden wird es sich daher um eine qualitative Betrachtung des Einflusses der Pyrolysetechnologie auf die geeigneten SDG-Indikatoren handeln. Eine quantitative Betrachtung ist nicht möglich.

Die SDG-Indikatoren orientieren sich an der Anzahl der SDG-Unterziele. Sie sollten durch die jeweilige Kommune selbst umsetzbar sein und konkrete zu betrachtende Werte festlegen. Da die SDG-Unterziele teilweise starke Interpretationsspielräume beinhalten, macht die Festlegung durch ein kommunales Gremium großen Sinn. Im Zeitraum von 2021 bis 2022 wurde der SDG-Indikatorenkatalog nochmals angepasst, so dass zu erkennen ist, dass dieser Werkzeugkasten der NE beständigem Wandel und regelmäßiger Optimierung durch gemachte Erfahrungen unterworfen ist (Riedel et al., 2022).

Einige SDG-Unterziele sind für Deutschland weniger von Belang, so dass hier auch keine SDG-Indikatoren erarbeitet werden müssen. Irrelevant aus sozioökonomischen und geographischen Gesichtspunkten sind momentan und voraussichtlich auch in der nahen Zukunft z. B. die SDG-Unterziele 11.1.2 (Beseitigung von Slums bis 2030) oder 15.3.1 (Bekämpfung von Wüstenbildung und Sanierung betroffener Flächen bis 2030) (Riedel et al., 2022).

Eine weitere Reduktion potenzieller kommunaler SDG-Indikatoren ergibt sich durch SDG-Unterziele, die für Kommunen irrelevant sind. Zu nennen wären z. B. 13.a (Finanzmittel für Entwicklungsländer für Klimaschutzmaßnahmen bereitstellen), da dies im Rahmen der internationalen Entwicklungszusammenarbeit eine nationale Aufgabe der Bundesrepublik Deutschland und ihrer dafür zuständigen Institutionen (z. B.

⁵⁸ <https://sdg-portal.de/de/sdg-indikatoren> (zug. am 29.09.2023)

Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH) ist. Einige SDG-Unterziele fallen auch nicht in den kommunalen Aufgabenbereich (14.a; Vertiefung wissenschaftlicher Kenntnisse im Bereich der Meeresforschung) oder sind rechtlich nicht durch Kommunen umsetzbar (16.10.2), da Kommunen Verstöße bei Grundfreiheiten bedingt durch rechtliche Rahmenbedingungen und die Gewaltenteilung nicht sanktionieren können (Riedel et al., 2022). Ebenso verhält es sich mit Punkten, die internationale Straftaten betreffen. Sie sind nicht im Kompetenzbereich von Kommunen sondern ebenfalls auf nationaler oder sogar internationaler Ebene verortet, wie z. B. beim SDG-Indikator 16.4.1 (Gesamtwert der ein- und ausgehenden illegalen Finanzströme).

Für die Gemeinde Windach mit ihrer geographischen Lage im bayerischen Voralpenland sind auch einzelne SDG und ihre Unterziele nicht von Belang, wie z. B. Meeresschutz (SDG 14), Bergschutz (Unterziel bei SDG 15), wodurch hier, aber auch in einer Vielzahl anderer Gemeinden, entsprechende SDG-Indikatoren nicht weiter betrachtet werden müssen.

Eine weitere Einschränkung ergibt sich dadurch, dass einzelne SDG-Unterziele in ihrer Formulierung in Deutschland kaum erreichbar sind, da durch technische und sozioökonomische Gegebenheiten bereits ein sehr hohes Niveau erreicht ist. So verlangt beispielsweise das SDG-Unterziel 3.6 die Halbierung der Todesfälle im Straßenverkehr, was durch die Ausgestaltung und Formulierung des Unterziels als in Deutschland unmöglich zu erreichen angesehen wird (Riedel et al., 2022).

5.2.2 Auswahl und Betrachtung geeigneter SDG-Indikatoren

Zunächst sollen potenziell infrage kommende SDGs (Smith, 2019) hinsichtlich ihrer regionalen Relevanz für das untersuchte Modellprojekt betrachtet werden. Anschließend werden daraus geeignete SDG-Unterziele und darstellbare SDG-Indikatoren zum Erreichen der Ziele qualitativ beschrieben. Hierbei soll auch, wo es möglich und sinnvoll ist, der aktuelle Stand bezüglich der Erfüllung der SDGs in Deutschland anhand des Freiwilligen Staatenberichts (*voluntary national review, VNR*) zum *High-Level Political Forum (HLPF)* (Deutsche Bundesregierung, 2021), des aktuellen UN Sustainability Reports (Sachs et al., 2023) und des SDG-Indikatorenberichts zur

nachhaltigen Entwicklung Deutschlands (Statistisches Bundesamt, 2023) berücksichtigt werden.

Nach einer ersten Analyse von Smith und Kollegen (2019) hat die CDR-Technologie der Pyrolyse Einfluss auf zwölf der 17 SDGs. Ein Überblick wird am Ende dieses Kapitels abschließend in Tabelle 4 auf Seite 45 zusammengefasst.

Gerade in Ländern des globalen Südens zeigt sich signifikanter Einfluss auf **SDG 1** (*Keine Armut*), indem ländlicher Bevölkerung Unabhängigkeit von externen Brennstoffen und bessere Einnahmemöglichkeiten durch erhöhte Produktivität der Böden attestiert werden. Ein Punkt, der in der hier untersuchten wohlhabenden Metropolregion München mit überdurchschnittlich hohen Primäreinkommen privater Haushalte je Einwohner (129,2 %) im Vergleich zum gesamten Bundesland Bayern (100 %) (Bayerisches Landesamt für Statistik, 2022), in der Windach/Hechenwang liegt, eher weniger signifikante Bedeutung hat. Hier ist auch die mit seit Mai 2021 beständig unter 3 % liegende Arbeitslosenquote im Landkreis Landsberg am Lech⁵⁹ zu nennen, um festzustellen, dass SDG 1 in der Region durchaus als erfüllt angesehen werden kann. Auf nationaler Ebene ist SDG 1 in Deutschland ebenfalls zu fast 100 % erfüllt (Sachs et al., 2023).

Der Einsatz von Produkten aus der Pyrolyse führt global in Bezug auf **SDG 2** (*Kein Hunger*), wie bereits bei SDG 1 erwähnt, zu erhöhter Lebensmittel- und regionaler Versorgungssicherheit (Smith, 2019). Überwiegend sollte hier anhand der zuvor genannten Punkte zur Einkommens- und Arbeitsmarktsituation auch keine Relevanz für Windach/Hechenwang entstehen. Wobei dem Stickstoffüberschuss in der deutschen Landwirtschaft (Deutsche Bundesregierung, 2021), der auch die bayerische Landwirtschaft betrifft, durch den filtrierenden Einsatz von Pflanzenkohle begegnet und Ökolandbau ausgebaut werden könnte. Stickstoffeintrag in den Boden geschieht über Ammonium- und Nitratverbindungen. Die Quellen dafür sind Landwirtschaft (Mineraldünger, Gülle) und Abgase aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe.⁶⁰ Der Betrieb von Pyrolysatoren als fossilfreie Wärmequelle für eine zentrale Wärmeversorgung reduziert zum einen den lokalen Einsatz fossiler Energieträger und damit die entsprechenden Abgase in der Region. Zum anderen kann die Pflanzenkohle

59 <https://statistik.arbeitsagentur.de/Auswahl/raeumlicher-Geltungsbereich/Politische-Gebietsstruktur/Kreise/Bayern/09181-Landsberg-am-Lech.html> (zug. am 18.09.2023)

60 https://www.lfu.bayern.de/umweltdaten/indikatoren/natur_landschaft/saeure_stickstoff/index.htm (zug. am 18.09.2023)

im Boden Stickstoffverbindungen aufnehmen und langsamer und effektiver an Pflanzen abgeben. Die Gefahr, dass Nitrate auf diese Weise schnell ins Grundwasser ausgewaschen werden und dieses belasten, ist dadurch verringert. Auch das verbesserte Wasserhaltevermögen von mit Pflanzenkohle durchsetzter Böden reduziert Auswaschungen ins Grundwasser. Der SDG-Indikator „Stickstoffüberschuss in der Landwirtschaft“ zum SDG-Unterziel 2.4.2 kann so durch den Einsatz von Pflanzenkohle verbessert werden. Bei der Erfüllung des SDG-Unterziels 2.4.2 geht es u. a. darum, eine resilientere Landwirtschaft zu erreichen und die Bodenqualität schrittweise zu verbessern (Riedel et al., 2022). Der SDG-Indikator zum Stickstoffüberschuss stagniert bundesweit seit 2010 zwischen 80 und 100 kg/ha (Statistisches Bundesamt, 2023). Eine Verbesserung auf 70 kg/ha ist das erklärte Ziel in den SDGs.

Bei **SDG 3** (*Gesundheit und Wohlergehen*) wird ebenfalls die verbesserte Versorgung mit Nährstoffen durch positive Effekte auf die Landwirtschaft anhand des Pflanzenkohleeinsatzes genannt (Smith, 2019). Der Teilbereich, auf den die Pyrolyse positiven Einfluss haben könnte, nämlich die Schadstoffbelastung der Luft, wird im aktuellen deutschen VNR inzwischen als erledigt angesehen (Deutsche Bundesregierung, 2019). Eine Abgasproblematik ist bei industriellen Pyrolysatoren - im Gegensatz zu Kleinanlagen - durch die überwachte Prozesssteuerung und den Einsatz passender Filter nach Vorgaben des deutschen Bundes-Immissionsschutzgesetzes⁶¹ nicht gegeben.⁶² So kann davon ausgegangen werden, dass die SDG-Unterziele 3.9.1 und 3.9.2, die darauf abzielen, Todesfälle durch giftige Chemikalien und Luftschadstoffe zu reduzieren, insofern positiv tangiert werden, als dass die lokale Luftqualität auch hier durch die Reduktion von fossilen Energieträgern in heimischen Einzelfeuerungsanlagen verbessert wird. Die Menge an Feinstaubpartikeln, die im dazu passenden SDG-Indikator erhoben werden (Riedel et al., 2022), sind im industriellen Prozess der Pyrolyse zentral besser zu kontrollieren und zu überwachen, als dies in der Gesamtanzahl an dezentralen Einzelfeuerungsanlagen möglich wäre, welche durch ein Wärmenetz substituiert werden. Die Menge an Luftschadstoffen sinkt deutschlandweit beständig (Statistisches Bundesamt, 2023) und wird bei voraussichtlich zunehmender

61 <https://www.gesetze-im-internet.de/bimschg/> (zug. am 02.10.2023)

62 <https://www.umweltbundesamt.de/umwelttipps-fuer-den-alltag/garten-freizeit/pyrolyseofen-zur-herstellung-von-pflanzenkohle> (zug. am 18.09.2023)

Defossilisierung und Dekarbonisierung des Energiesektors noch besser werden, um das gesteckte Ziel in den SDGs erreichen zu können.

Smith und Kollegen (2019) nennen bei **SDG 6** (*Sauberes Wasser und Sanitäreinrichtungen*) die Ad- und Absorptionsfähigkeit von Schadstoffen durch Pflanzenkohle und somit die Verringerung der Auswaschung ebendieser ins Grundwasser. Das Potenzial, Nitrat und andere Schadstoffe im Grundwasser durch Pflanzenkohle als filtrierender und wasserhaltender Bodenzusatz zu verringern, wurde bereits bei SDG 2 erläutert. Im deutschen VNR wird als zu verbessernder Aspekt die Konzentration von Phosphor und Nitrat im Grundwasser genannt (Deutsche Bundesregierung, 2021; Statistisches Bundesamt, 2023). Das SDG-Unterziel 6.3.1 ist dabei zu beachten, welches darauf abzielt, die Wasserqualität weltweit durch das Einbringen von weniger Giftstoffen zu verbessern. Der dazugehörige SDG-Indikator bezieht sich auf die Grundwassermessstellen, an denen Nitrat- und Phosphorgrenzwerte überschritten werden in Relation zur Gesamtanzahl an Grundwassermessstellen (1.214 Stück insgesamt) (Riedel et al., 2022).

Die Nutzung von Abwärme aus Pyrolyseprozessen ist offensichtlich eine *Bezahlbare und saubere Energie* (**SDG 7**), wenn sowieso anfallende und damit preiswerte Abfall- und Reststoffe als Rohstoff verwendet werden (Smith et al., 2019). Als SDG-Unterziel mit kommunaler Relevanz kommt hier 7.a.2 (Ausgaben des kommunalen Haushalts für Investitionen in den Ausbau erneuerbarer Energien an den Gesamtausgaben) infrage. Hier werden als SDG-Indikator die kommunalen Ausgaben in erneuerbare Energien analysiert (Riedel et al., 2022). Die dazugehörigen SDG-Unterziele 7.1 und 7.2 und die messbaren SDG-Indikatoren beziehen sich allerdings beim Begriff „Energie“ lediglich auf elektrische Energie und den erneuerbaren Anteil daran. Erneuerbare Wärmeenergie kommt in der aktuellen Betrachtung von SDG 7 nicht vor. Der Anteil erneuerbarer Energien am deutschen Gesamtstromverbrauch ist laut VNR auf einem guten Wege (Deutsche Bundesregierung, 2021). Im bearbeiteten Fall ist die Betrachtung elektrischer Energie aus erneuerbaren Quellen nicht von Relevanz und eine Ungenauigkeit hinsichtlich der Verwendung des Begriffes „Energie“ ist bei den SDG-Unterzielen und SDG-Indikatoren festzuhalten. Der SDG-Indikator 7.2.a Anteil erneuerbarer Energien am Brutto-Endenergieverbrauch beleuchtet national allerdings sehr wohl sämtliche Energieformen und den Anteil erneuerbarer Energien (Statistisches Bundesamt, 2023).

Der Einsatz Pyrolyse in der Wärmeversorgung kann hier weiter förderlich sein. Eine dringend benötigte Verbesserung in diesem Bereich ist auch im UN Bericht zu erkennen (Sachs et al., 2023).

Bei Smith und Kollegen werden **SDG 8** (*Menschenwürdige Arbeit und wirtschaftliches Wachstum*), **SDG 9** (*Industrie, Innovation und Infrastruktur*) und **SDG 10** (*Weniger Ungleichheiten*) genannt. Die positiven Aspekte von PyCCS, die hier beschrieben werden, zielen hauptsächlich auf die Situation im globalen Süden ab. So geht es hier beispielsweise um verbesserte Lebensbedingungen und erhöhte Unabhängigkeiten der ländlichen Bevölkerung, bezahlbare Energieversorgung und verbesserte Gesundheitsbedingungen für Frauen z. B. beim Kochen durch sauberere Verbrennungsprozesse. Im UN Sustainability Report stehen die drei genannten SDGs für Deutschland bei hohen Erfüllungsgraden (Sachs et al., 2023). Bei Riedel et al. (2022) finden sich keine geeigneten SDG-Indikatoren, die auf die Verwendung von Pyrolyse und ihre Resultate passen. Bei Betrachtung des aktuellen deutschen VNR zeigt sich, dass bei SDG 8 und SDG 9 bereits ein sehr guter Erfüllungsgrad vorliegt. Bei SDG 9 wird dort noch die Nationale Bioökonomiestrategie genannt, mit Hilfe derer ein Wandel der Wirtschaft zu natürlichen Stoffkreisläufen und mehr Nachhaltigkeit gefördert werden soll (Deutsche Bundesregierung, 2021). Natürliche Stoffkreisläufe finden sich bei der Pyrolyse mit Holzhackschnitzeln oder biogenen Reststoffen aus lokalen Quellen und dem anschließenden Einsatz der Pflanzenkohle in der Landwirtschaft. Beim Nachhaltigkeitsziel der Infrastruktur wäre eine Verbesserung der Wärmeenergieversorgung in Deutschland durch fossilfreie Wärmenetze denkbar. Hier finden sich bei den SDG-Indikatoren Schnittmengen mit SDG 7 (erneuerbare Energien, siehe dort), SDG 12 (Recyclingquote, s. dort) oder SDG 13 (THG-Emissionen, s. dort). Ein weiterer förderlicher Effekt für die NE in Deutschland ist bei den genannten drei SDGs 8, 9 und 10 durch die Pyrolyse nicht zu erkennen.

Das verbesserte Wachstum von Stadtbäumen ist ein Effekt, der bei **SDG 11** (*Nachhaltige Städte und Gemeinden*) durch Smith et al. (2019) beschrieben wird. Dazu kann als konkretes und erfolgreiches Beispiel das Stadtbaum-Projekt in Stockholm genannt werden. Frisch gepflanzte Stadtbäume entwickeln sich entlang der städtischen Straßen Stockholms durch Zugabe von Pflanzenkohle im Substrat innerhalb speziell entwickelter Pflanzbereiche besser und fördern so schlussendlich ein gesünderes

Stadtklima (Alvem & Grönjord, 2017). Dies ist ein Konzept, das bereits kopiert wird und auch bei der Anlage von Alleen oder Einzelbaumpflanzungen im ländlichen Raum umgesetzt werden kann. Die positiven Aspekte von naturbasierten Lösungen, grünen Infrastrukturen und insbesondere Bäumen im Hinblick auf Klimaschutz und Klimaanpassung sind in verschiedenen Publikationen weitreichend erörtert (z. B. UBA, 2022c). Die Erfüllung des Ziels, den Klimawandel abzuschwächen, welches sich im SDG-Unterziel 11.b.1 findet mit dem dazugehörigen SDG-Indikator, dem Anteil fertiggestellter Wohngebäude mit erneuerbarer Heizenergie an der Gesamtzahl aller Gebäude zu erhöhen, ist klar durch die Verwendung fossilfreier Heiztechniken in Wärmenetzen unterstützt. Das SDG-Unterziel 11.6 mit den Inhalten, die Luftqualität zu erhöhen und ein verbessertes Abfallmanagement zu erreichen (Riedel et al., 2022), ist mittels Energiegewinnung und Verarbeitung von lokal vorkommenden pflanzlichen Abfällen durch Pyrolyse unterstützt. Im deutschen VNR finden sich einige geeignete Anhaltspunkte bei SDG 11, wie z. B. der beabsichtigte ressourceneffiziente Umbau von Quartieren oder das Ziel den klimaneutralen Gebäudebestand in Städten und ländlichen Kommunen zu erhöhen (Deutsche Bundesregierung, 2021). Im UN Sustainability Report findet sich in Bezug auf SDG 11 für Deutschland ebenfalls ein bereits hoher Erfüllungsgrad (Sachs et al., 2023).

Smith und Kollegen (2019) nennen bei **SDG 12** (*Nachhaltige/r Konsum und Produktion*) Ertragssteigerungen im Ackerbau und verbesserte Gesundheit in der Tierhaltung durch den Einsatz von Pflanzenkohle als Nahrungsmittelergänzung für Nutztiere. Punkte, die auch im deutschen ländlichen Einsatz als sinnvoll erscheinen. Bei den SDG-Unterzielen finden sich 12.2 und 12.5. Bei 12.2 geht es u. a. um den SDG-Indikator direkter und indirekter Energieverbrauch. Bei 12.5 geht hier um die Vermeidung und Verwertung von Abfällen. Die Erhöhung der Recyclingquote stofflich verwertbarer Siedlungsabfälle ist der dazugehörige SDG-Indikator (Riedel et al., 2022), welcher nach UN Sustainability Report in Deutschland bereits erfüllt ist (Sachs et al., 2023). Auf beide hat die Pyrolyse von Pflanzenabfällen und der anschließenden Verwendung der Wärmeenergie und Pflanzenkohle positiven Einfluss. Im VNR der Deutschen Bundesregierung (2021) werden im Bereich von SDG 12 noch das Engagement für die Weiterentwicklung der Kreislaufwirtschaft und entwaldungsfreie Lieferketten aufgezählt. Durch den Einsatz von gut nutzbarem, lokalem Abfall- und Restholz läuft man nicht Gefahr Biomassebrennstoffe (z. B. Holzpellets) zu beziehen,

deren Herstellung potenziell zum Raubbau an verschiedenen tropischen und borealen, ökologisch höchst wertvollen Urwäldern führen könnte. Der Einsatz von Holzpellets wird durch hohen Energiebedarf in der Herstellung und Transportaufwand obendrein von Teilen der wissenschaftlichen Gemeinschaft als nicht THG-neutral angesehen (zusammengefasst bei br.de⁶³).

Bei **SDG 13** (*Maßnahmen zum Klimaschutz*) wird die Kohlenstoffsequestrierung in Form der Pflanzenkohle und die Verringerung von Lachgas- und Methanemissionen aus Böden durch den Einsatz der Pflanzenkohle als Bodensubstrat genannt (Werner et al., 2018; Smith et al., 2019). Dies ist ein Bezug zu den internationalen Nachhaltigkeitszielen, der sowohl im globalen Süden als auch im wohlhabenderen globalen Norden umsetzbar ist. Im SDG-Unterziel 13.2 „Klimaschutzmaßnahmen in die nationalen Politiken, Strategien und Planungen einbeziehen“ finden sich dafür vier geeignete SDG-Indikatoren. Es handelt sich dabei um die THG-Emissionen privater Haushalte, kommunaler Liegenschaften, der Industrie und von Gewerbe/Handel/Dienstleistung (GHD). Diese reduzieren sich durch die Dekarbonisierung und Defossilisierung der zentralen Heizsysteme, welche sich durch die Umsetzung des GEG ergeben. Der Einsatz von NET beschleunigt diese Transformation. Ein weiterer SDG-Indikator ist die realisierte und prognostizierte Einsparung von THG-Emissionen (Riedel et al., 2022). In sämtlichen Berichten ist zu erkennen, dass die THG-Emissionsminderung der Bundesrepublik Deutschland den selbstgesteckten Zielen des nationalen Klimaschutzgesetzes, bis 2030 die THG-Emissionen um 65 % in Bezug auf die Werte von 1990 zu reduzieren und anschließend die THG-Neutralität bis 2045 zu erreichen, mit den aktuellen Maßnahmen nicht erfüllt werden können (Deutsche Bundesregierung, 2021; Sachs et al., 2023; Statistisches Bundesamt, 2023).

SDG 12 und SDG 13 sind diejenigen, bei denen Deutschland in Bezug auf Erfüllung und Performanz am schwächsten dasteht (Sachs et al., 2023). Hier sind die Herausforderungen und Möglichkeiten also besonders groß und der Einsatz von Pyrolysetechnologie und Pflanzenkohle kann positiv darauf einwirken.

Smith et al. (2019) finden keinen Bezug von Pflanzenkohle auf die Erfüllung von **SDG 14** (*Leben unter Wasser*). Dieses Nachhaltigkeitsziel bezieht sich auf Ozeane und

63 <https://www.br.de/nachrichten/wissen/schlechte-klima-bilanz-fuer-holzpellets,Rh2umI1> (zug. am 02.10.2023)

Meere. Der Nährstoffeintrag in die Meere geschieht überwiegend durch Flüsse, weshalb sich ein geeigneter SDG-Indikator im SDG-Unterziel 14.1 findet, über den PyCCS Einfluss auf SDG 14 nehmen kann. Es geht um die Gesamtposphorkonzentration in Fließgewässern (Riedel et al., 2022), die, wie bereits beschrieben, durch die Ad- und Absorptionsfähigkeiten der Pflanzenkohle reduziert werden kann. Das Gleiche gilt für Stickstoffeinträge in Ozeane und Meere in Form von Nitraten, welche über den deutschen SDG-Indikator 14.1.a erfassbar sind (Deutsche Bundesregierung, 2021; Statistisches Bundesamt, 2023). Ein weiterer positiver Einfluss auf SDG 14 ergibt sich durch Ideen von Start-Up-Firmen, wie z. B. CarbonKapture aus dem Vereinigten Königreich.⁶⁴ Das Geschäftsfeld ist, schnell wachsendes Kelp in Küstenregionen zu kultivieren und die dabei resultierende Biomasse anschließend zu pyrolysieren. Am Ende soll die Pflanzenkohle und CO₂-Zertifikate gewinnbringend genutzt werden. Ein positiver Einfluss auf die Biodiversität im Lebensraum Meer ergibt sich durch die Kelpfarmen, welche Schutz und Lebensraum für Klein(st)lebewesen und heranwachsende Fischlarven bieten. Dies ist zwar nicht im Gemeindebereich von Windach zu realisieren, zeigt allerdings das Potenzial nachhaltiger Entwicklung, welches Pyrolyse von Biomasse weltweit auch in ähnlich großen Kommunen von Küstenregionen entfalten könnte.

In Bezug auf **SDG 15** (*Leben an Land*) erhöht Pflanzenkohle die Bodenfruchtbarkeit und ermöglicht verbesserte Lebensbedingungen für das Mikrobiom im Boden und somit auch für eine erhöhte Biodiversität an sich (Smith et al., 2019). Hier sind Parallelen im deutschen VNR zu erkennen. Die Artenvielfalt wird dort auch als dringende, noch zu lösende Herausforderung festgestellt. Eine nachhaltige Bewirtschaftung des Forsts und Artenschutz ist in der deutschen Waldstrategie festgehalten. In der Eutrophierung von Ökosystemen wird ein Problem erkannt (Deutsche Bundesregierung, 2021). Dabei werden die SDG-Unterziele 15.2.1 der „Förderung nachhaltiger Bewirtschaftung aller Waldarten, der Beendigung von Entwaldung und Wiederherstellung geschädigter Wälder“, 15.3.2 der „Neutralisierung der Landverödung“ und 15.5.2 „Artenschutz“ mit ihren SDG-Indikatoren angesprochen (Riedel et al., 2021). Alles Punkte bei denen PyCCS unterstützen kann durch Nutzung von Schadholz in der nachhaltigen lokalen Waldbewirtschaftung oder der Verbesserung der Qualität von Böden im Forst durch den Einsatz der Pflanzenkohle. Die Eutrophierung wird durch den SDG-Indikator an

64 <https://carbonkapture.com/> (zug. am 22.09.2023)

stickstoffüberlasteter Ökosysteme ermittelt (Statistisches Bundesamt, 2023), welcher durch den Einsatz Pflanzenkohle im Boden verbessert werden kann.

SDG	SDG-Unterziel	SDG-Indikator	Einfluss
1			0
2	2.4.2	Stickstoffüberschuss	+
3	3.9.1		0
	3.9.2	Feinstaub	+
6	6.3.1	Nitrat/Phosphorgrenzwerte im Grundwasser	+
7	7.a.2	Ausgaben erneuerbare Energien	+
	7.1		0
	7.2		0
8			0
9			0
10			0
11	11.b.1	Gebäude mit erneuerbarer Heizenergie	+
	11.6		+
12	12.2	Energieverbrauch durch natürliche Ressourcen	+
	12.5	Recyclingquote	+
13	13.2	THG-Emissionen privater Haushalte	+
		THG-Emissionen Industrie	+
		THG-Emissionen GHD	+
		THG-Emissionen kommunale Liegenschaften	+
		Realisierte THG-Minderungen	+
14	14.1	Phosphorkonzentration in Fließgewässern	+
15	15.2.1	Nachhaltige Forstwirtschaft	+
	15.3.2		0
	15.5.2		0
17	17.1		+
	17.17		+

Tabelle 4: Zusammenfassung der durch PyCCS beeinflussten SDGs, SDG-Unterziele und SDG-Indikatoren für Kommunen (nach Riedel et al., 2022).

Das letzte **SDG** mit der Nummer **17** (*Partnerschaften zur Erreichung der Ziele*) wird bei Smith et al. (2019) nicht erwähnt. Hier finden sich bei Betrachtung des vorliegenden Modells allerdings in den SDG-Unterzielen 17.1 der „Stärkung einheimischer Ressourcen“ und 17.17 der „Bildung wirksamer öffentlicher, öffentlich-privater und zivilgesellschaftlicher Partnerschaften“, wie sie zur Planung, dem Aufbau und Betrieb von lokalen Nah- und Fernwärmenetzen nötig sind, Anknüpfungspunkte für Pyrolyse im ländlichen Raum.

6 Empfehlungen für einen konkurrenzfähigen Betrieb von Pyrolysatoren

Der breite Einsatz einer Technologie in unserem Wirtschaftssystem steht und fällt mit der finanziellen Darstellbarkeit. Die Betriebswirtschaftlichkeit im vorgestellten Modell ist unter gewissen Bedingungen, welche den Verkauf von CO₂-Zertifikaten beinhalten, durchaus gegeben.

Daneben entstehen auch Kosten, die vom Ausgangsrohstoff abhängen und die sich auf die gebundenen THGs umlegen lassen. Eine erste Kostenanalyse der Pyrolysetechnologie mit Pflanzkohle in Deutschland beschreibt eine hohe Abhängigkeit der Kosten pro gebundener Tonne CO₂-Äquivalente von Ausgangsrohstoff (Teichmann, 2015). Dabei kommen Grünschnitt aus Freiflächen und Holzreste aus kommunaler Baumpflege im Jahr 2012 mit Kosten von unter 40 € pro t CO₂ aus. Für die Jahre 2030 und 2050 werden Kosten von unter 100 € pro t CO₂ vorhergesagt bei kleinen Pyrolysatoren, wie sie in Entwicklungsländern Einsatz finden. Damit befinden sich die beiden Rohstofftypen deutlich im unteren Bereich der in Kapitel 2.3 genannten Kosten für die Bindung von CO₂ aus der Atmosphäre. Beim Einsatz großer, technisch ausgereifter Pyrolysatoren sind sogar negative Preise von fast -100 € für die Tonne gebundenem Kohlenstoffdioxid möglich. Bemerkenswert ist, dass Restholz aus der Forstwirtschaft hier zu den höchsten Preisen (knapp 100 € pro Tonne CO₂) führt, es dabei aber aufgrund der Rohstoffverfügbarkeit das vergleichsweise größte Kohlenstoffbindungspotenzial gibt.

Eine öffentliche Förderung kann den Einsatz und die öffentliche Akzeptanz neuer Technologien unterstützen. Pyrolysatoren sind aktuell nur förderfähig durch das BAFA im Rahmen des Moduls 4 im Bereich „Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft“.⁶⁵ Dies betrifft allerdings nur wirtschaftliche Prozesse. Prozesse, in denen es vorrangig um die Produktion von Wärme geht oder kommunale Anwendungen, sind von dieser speziellen Förderung ausgeschlossen. Eine Ausweitung auf kommunale Anlagen mit Schwerpunkt von PyCCS, die nicht nur Modell- oder Demonstrationscharakter besitzen, sollte daher von Bund und Ländern dringend in Betracht gezogen werden. So

65 https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Energieeffizienz_und_Prozesswaerme/Modul4_Energiebezogene_Optimierung/modul4_energiebezogene_optimierung_node.html (zug. am 06.07.2023)

kann es gelingen, risikoarme NET im Sinne des Klimaschutzes in Deutschland zu etablieren.

Weitere großflächige und langfristige Bundes- oder Landesförderungen für die hier untersuchte PyCCS-Technologie, die eine Vielzahl an beschriebenen Vorteilen und Synergien im Sinne der NE aufweist, wären angezeigt, um dem Einsatz von Pyrolysatoren einen Weg aus dem Nischendasein in der Wärmeenergiebranche und biogener Kohlenstoffsequestrierung zu verhelfen.

Wichtig für die Zertifizierung von CO₂-Senken sind nach Vorgaben des Pariser Klimaschutzabkommens die Charakteristika „Zusätzlichkeit“ und „Permanenz“ (UN, 2015a). Diese sind durch den Einsatz von Pflanzenkohle als NET gegeben (UBA, 2023c). Das CO₂-Senkenpotenzial von Pflanzenkohle ist inzwischen daher sicher zertifizierbar und finanziell gut nutzbar. CO₂-Senkenzertifikate werden in dem Bereich durch verschiedene fachlich qualifizierte Dienstleister (z. B. First Climate AG⁶⁶ oder Carbon Standards International AG⁶⁷ (EBC, 2020)) nach strengen, objektiven, reproduzierbaren und transparenten Richtlinien, unabhängig evaluiert (vgl. Stockmann und Meyer, 2017, Kapitel 2) und in den Markt gebracht. Das ökonomische Potenzial wurde bei der Kalkulation des Break-Evens im vorliegenden Modell anhand eines verhältnismäßig kleinen Pyrolysators beispielhaft gezeigt. Größere, industrielle Pyrolyseanlagen produzieren dementsprechend höhere Wärmemengen, setzen mehr Biomasse in Pflanzenkohle um und erzielen somit auch mehr CO₂-Senkenzertifikate mit größerer ökologischer Wirkung in Atmosphäre und Boden und erhöhtem finanziellen Nutzen.

Neben der Möglichkeit, CO₂-Senken zu zertifizieren, gibt es auch den umgekehrten Markt, dass Verursacher von CO₂-Emissionen am Emissionsrechtehandel der EU teilnehmen müssen und finanziell belastet werden. Emissionen aufgrund von Biomassenutzung oder im Gebäudesektor sind davon aktuell ausgenommen (Beuermann, 2023). Die Umweltschutzorganisation Greenpeace fordert die Erweiterung von CO₂-Bepreisung auf die CO₂-Bruttoemissionen bei der Verfeuerung von Holz und Biomasse. Dies wird darin begründet, dass in der Forstwirtschaft, z. B. durch den Einsatz von durch fossile Energieträger angetriebenen Ernte- und Transportmaschinen mehr CO₂ ausgestoßen wird als im Wald durch Pflanzenwachstum wieder

66 <https://www.firstclimate.com/co2-speicherung-durch-pflanzenkohle> (zug. am 25.09.2023)

67 <https://www.european-biochar.org/de/home> (zug. am 25.09.2023)

aufgenommen wird (Greenpeace, 2022). Für den Einsatz von Pyrolyseanlagen mit ihren, wie gezeigt, deutlich geringeren CO₂-Emissionen im Vergleich zur klassischen Verbrennung und letztendlich auch als NET würde die Umsetzung dieser Forderung einen Schub verleihen.

Laut Experten der Bayerischen Landesagentur für Energie und Klimaschutz (LENK) sollte die Düngemittelverordnung mit einem klaren rechtlichen Rahmen zu Brennstoffen (Kohle) ergänzt werden, um den Einsatz von Pflanzenkohle als Bodensubstrat in der Landwirtschaft zu erleichtern.⁶⁸

Es bietet sich an, die biogenen Rohstoffe für die Pyrolyse v. a. aus Reststoffen zu gewinnen. Dies wurde im Modell durch Holzabfälle einer Zimmerei oder Rest- und Kalamitätsholz aus dem Wald beschrieben. Alternativ sollten solche Reststoffe eingesetzt werden, welche große Vorteile auf der Kostenseite bringen können (Teichmann, 2015). Der Einsatz von Reststoffen dient dazu, der potenziellen Kritik an negativen ökologischen und sozialen Effekten durch Rohstoffabbau und Rohstoffgewinnung (z. B. DUH, 2021; CIEL, 2023) proaktiv entgegenzuwirken und auch positive Aspekte der NE in der Region zu generieren, voranzutreiben und zu nutzen.

Um die erhaltene Pflanzenkohle im Anschluss sinnvoll und in geeigneten Anwendungsfällen verwerten zu können und um einen potenziellen Schadstoffeintrag in Böden (UBA, 2016) zu vermeiden, ist es unerlässlich, sie unabhängig und nach objektiven Maßstäben durch externe Experten evaluieren (Stockmann und Meyer, 2017, Kapitel 2) und zertifizieren zu lassen, wie es z. B. durch das European Biochar Certificate (EBC) Verfahren, einem freiwilligen Industriestandard, geschehen kann (EBC, 2023). Dies gewährleistet im Rahmen anerkannter, regelmäßiger Laboruntersuchungen die Qualität und die Inhaltsstoffe der Pflanzenkohle und bietet eine Qualitätskontrolle für den Pyrolyseprozess. Es gibt hierbei verschiedene Qualitätsstufen an Pflanzenkohle, welche dann über die unterschiedlichen Einsatzbereiche entscheiden. Die Pflanzenkohle mit der höchst möglichen Zertifizierungsstufe ist dann beispielsweise in der Tierhaltung der Biolandwirtschaft als Futterzusatz einsetzbar. Pflanzenkohle der niedrigsten Qualitätsstufe eignet sich beispielsweise nur als Materialrohstoff für Baumaterialien, wie z. B. Zement.

68 Webinar 21.07.2023: Teil 3: „Multitalent Bio Raffinerie – Fokus Pflanzenkohle“ (https://www.carmen-ev.de/wp-content/uploads/2023/04/Flyer_Multitalent-Bioraffinerie.pdf) (zug. am 24.07.2023)

Unterschiedliche Preise sind bei unterschiedlichen Zertifizierungsstufen für die Pflanzkohle zu erzielen.

Das beim Verkohlungsprozess anfallende Pyrolyseöl kann und sollte zur weiteren Verwendung außerhalb des Pyrolysators abgeschieden werden. Meist wird es aktuell einfach als Brennstoff weiter genutzt, um den autothermen Pyrolyseprozess zu unterstützen. Das Pyrolyseöl, ein Gemisch aus verschiedenen Kohlenwasserstoffen kann aber als wertvoller Rohstoff in der chemischen Industrie zur Substitution fossiler Kohlenwasserstoffe genutzt werden. So kann durch Weiterverkauf und Nutzung des Pyrolyseöls außerhalb des Pyrolyseprozesses zusätzliches Einkommen für die Betreiber von Pyrolysatoren generiert werden. Zeitgleich kann in der chemischen Industrie die Defossilisierung vorangetrieben werden, was sich folglich positiv in der seit diesem Jahr in der Europäischen Union verpflichtenden Nachhaltigkeitsberichterstattung für Unternehmen im Rahmen der Corporate Social Reporting Directive⁶⁹ niederschlagen wird. Natürlich kann das Pyrolyseöl am Ort des Wärmenetzes auch als biogener, fossilfreier Energiespeicher für eventuell benötigte Lastspitzen im Heizsystem genutzt werden.⁷⁰

Im konkreten Modellbeispiel war auffällig, dass aufgrund mangelnder Daten aus dem Bauhof der Gemeinde eine genaue Potenzialanalyse der verfügbaren Biomasse aus Grünpflege- und Wegesicherungsmaßnahmen durch Holzschnitt nicht durchführbar ist. Ein künftiges Monitoring des anfallenden Restholzpotenzials und Grünschnitts ist für jede Gemeinde, die beabsichtigt Biomasse künftig vermehrt als Energiequelle zu nutzen, dringend zu empfehlen, um eine fundierte Datengrundlage für Machbarkeits-, Transformationsstudien und die Auslegung der Pyrolysatoren im Prozess der Projektierung von Wärmenetzen den Planungsdienstleistern zur Verfügung stellen zu können. Das Ziel muss dann sein, sie dann anschließend zur Wärmeproduktion auch als kostengünstigen Rohstoff einsetzen zu können.

In der künftigen Umsetzung des in der Öffentlichkeit und politischen Landschaft kontrovers diskutierten Bundesgesetzes zur Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen,

69 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32022L2464> (zug. am 02.10.2023)

70 Webinar 21.07.2023: Teil 3: „Multitalent Bioraffinerie – Fokus Pflanzkohle“ (https://www.carmen-ev.de/wp-content/uploads/2023/04/Flyer_Multitalent-Bioraffinerie.pdf) (zug. am 24.07.2023)

das sich im dritten Quartal 2023 noch im Gesetzgebungsverfahren befand,⁷¹ sollen Kommunen jeglicher Größe bis spätestens 2028 zur Durchführung einer kWP verpflichtet werden. Im Rahmen der kWP werden durch Fachexperten des Wärmesektors u. a. Wärmebedarfe und Wärmepotenziale vor Ort gegenübergestellt und eine lokale Wärmewendestrategie für die Gemeindeparlamente erarbeitet und vorgeschlagen. Die Planungskompetenz dafür haben viele Ingenieurbüros und Dienstleister aus dem Heizungsbereich. Die Möglichkeiten der Pyrolyse als Chance für fossilfreie Wärmegewinnung im Grundlastbereich mittels lokaler, nachhaltiger Ressourcen zur Energiebelieferung von Nah- und Fernwärmenetzen muss hier durch verstärkte Informationsangebote gerade bezüglich der ökologischen Synergien und ihrer ökonomischen Konkurrenzfähigkeit bei den Planern eingebracht werden.

71 <https://www.bmwsb.bund.de/SharedDocs/gesetzgebungsverfahren/Webs/BMWSB/DE/kommunale-waermeplanung.html> (zug. am 01.10.2023)

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zunächst beschrieben und begründet, dass gerade in Deutschland die Wärmewende zu fossilfreien Lösungen optimalerweise mit Hilfe von risikoarmen NETs dringend vorangetrieben werden sollte. Die Bedeutung und Möglichkeiten, THGs aktiv durch CDR-Technologien aus der Atmosphäre zu entnehmen, wurden vorgestellt und die Technik von PyCCS wurde als eine sinnvolle Option dafür vorgeschlagen. Der synergistische Einsatz von fossilfreier Wärmeversorgung in Kombination mit PyCCS-Technologien ist möglich und wurde anhand eines Modellbeispiels in der Gemeinde Windach in Oberbayern präsentiert. Auch wenn aktuell noch kleine ökonomische Vorbehalte und Hemmnisse zum Einsatz von Pyrolysatoren im Vergleich zu klassischen Biomasseheizkesseln bestehen, welche durch gesetzgeberische Vorgaben im Hinblick auf THG-Neutralität und der Pflicht, unvermeidbare THG-Emissionen künftig durch THG-Zertifikate zu kompensieren, bald hinfällig sein werden, konnte gezeigt werden, dass der Betrieb von Pyrolysatoren als fossilfreie Wärmequellen für kommunale Wärmenetze betriebswirtschaftlich darstellbar ist. Empfehlungen und Vorschläge die Betriebswirtschaftlichkeit und Umsetzung zu erleichtern, wurden im Kapitel 6 gegeben.

Es kann für die Gesamtgemeinde Windach nur ein Teil der benötigten Wärme aus Biomasse (15 %) bereitgestellt werden. Der Rest des fossilfreien Wärmebedarfs in Wärmenetzen und dezentralen Einzelhauslösungen muss künftig technologieoffen aus einem Mix aus Umweltwärme (verschiedenste Wärmepumpen), (industrieller) Abwärme, Solarthermie und elektrischen Lösungen bereitgestellt werden. Wie der Wärmemix in der Gemeinde Windach aber auch anderer Kommunen in Deutschland künftig aussehen wird, muss durch eine anstehende kWP ermittelt und anschließend den jeweiligen Lokalparlamenten vorgeschlagen werden.

Bis auf das „P“ Peace sind verschiedenste SDGs der vier anderen „Ps“ People, Planet, Prosperity und Partnership aus der Agenda 2030 vertreten. Das Prinzip der Unteilbarkeit ist daher überwiegend gegeben. Vor allem, wenn man berücksichtigt, dass der betrachtete Fall ein kleiner Mosaikstein der gesamten Nachhaltigkeitsstrategie Deutschlands ist.

Insgesamt sind durch die besprochene Technologie 14 der 17 Nachhaltigkeitsziele der Agenda 2030 betroffen. Es wird zur Erfüllung von mindestens 18 der SDG-Unterziele durch eine mögliche Verbesserung von 14 SDG-Indikatoren für Kommunen beigetragen (siehe Tabelle 4). Es gibt in Deutschland 7.830 Kommunen mit einer Bevölkerungsanzahl unter 5.000.⁷² Diese sind nicht in der Datenbank der SDG-Indikatoren für Kommunen enthalten.⁷³ Hier existiert also ein großer potenzieller zusätzlicher Hebel für die Erreichung der deutschen Nachhaltigkeitsziele, wenn die SDG-Indikatoren hier künftig auch statistische Erfassung finden würden. Aus diesem Grund war es in der vorliegenden Arbeit auch lediglich möglich, rein qualitativ und nicht quantitativ auf die Erfüllungsgrade der SDG-Indikatoren für Kommunen einzugehen.

Der entsprechende SDG-Indikator für Kommunen zu SDG 7 bezüglich erneuerbarer Energien sollte bald durch die bearbeitenden Organisatoren überprüft werden und auf die Bereitstellung von erneuerbarer Wärmeenergie als nicht unbedeutender Bereich des Energiesektors erweitert werden. So kann die deutsche Wärmewende hin zu erneuerbaren, fossilfreien Lösungen gemonitort und vorangetrieben werden. Die fossilfreie Wärmewende wird auch durch das GEG gefordert und mithilfe von BEW und BEG durch Bundesmittel finanziell gefördert. Die kommende Pflicht zur kWP fordert und unterstützt ebenso die Wärmewende zu fossilfreien, wärmenetzgebundenen Lösungsansätzen.

Bezogen auf die Fragestellung dieser Arbeit, lässt sich feststellen, dass bei der Vielfalt an betroffenen SDGs die drei Dimensionen der NE „Ökologie, Soziales und Ökonomie“ im ländlichen Raum Oberbayerns durch Pyrolyse positiv beeinflusst werden.

„Unser Planet befindet sich immer noch in der Notaufnahme. Wir müssen die Emissionen jetzt drastisch reduzieren“⁷⁴ so der UN-Generalsekretär António Guterres bei seiner Rede zum Abschluss der Weltklimakonferenz 2022 in Ägypten. Ferner fordert er dabei den Ausstieg aus fossilen Energieträgern und den Ausbau erneuerbarer Energien konsequent voranzutreiben. Um effektiven Klimaschutz zu erreichen, sollte ein Augenmerk auf NET gelegt werden (IPCC, 2021, 2022a, 2022b), um nicht nur weitere THG-Emissionen zu reduzieren, sondern Kohlenstoff aktiv aus der Atmosphäre

72 <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1254/umfrage/anzahl-der-gemeinden-in-deutschland-nach-gemeindegroessenklassen/> Stand 31.12.2021 (zug. am 06.10.2023)

73 <https://sdg-portal.de/de/sdg-indikatoren> (zug. am 29.09.2023)

74 <https://unric.org/de/cop27guterres21112022/> (zug. am 04.10.2023)

zu entnehmen. Bei all den Kritiken an den Sachstandsberichten des IPCC im allgemeinen (z. B. CIEL, 2023) und an klassischen CCS-Technologien im speziellen, was die Effektivität oder den Energiebedarf angeht (z. B. UBA, 2023d), ist aufgrund der verhältnismäßig geringen Kosten für die Bindung von THG aus der Atmosphäre in Kombination mit den beschriebenen Vorteilen in der NE und den geringen, kontrollierbaren Risiken, ist die Nutzung von PyCCS als NET zur Energiegewinnung und Pflanzenkohleproduktion eine empfehlenswerte Option, die sich Ökosystemleistungen zunutze macht. Auch wenn die Kohlenstoffsequestrierung durch Pflanzenkohle nur einen kleinen Teil der global benötigten Kohlenstoffbindung aus der Atmosphäre leisten kann, ist sie dennoch vom momentanen Standpunkt aus gesehen, schnell skalierbar und wirtschaftlich dank der verschiedenen Anwendungsfelder und einer Vielzahl an einsetzbaren Rohstoffen weltweit einsetzbar und sollte auf allen Politikebenen beachtet und vorangetrieben werden, um ihren möglichen Beitrag zum Klimaschutz zu nutzen.

In vergangenen Studien über die Wirkung von Pflanzenkohle auf die Bodenfruchtbarkeit in Oberbayern ergaben sich keine ersten Hinweise auf positive Effekte (Paetsch et al., 2018). Vielleicht lag es dabei an den bereits sehr hochwertigen Böden im untersuchten Raum um Freising-Weihestephan. Um dies auszuschließen und um langfristige Effekte im Boden und möglichen Synergien im süddeutschen Raum beurteilen zu können, existieren weitere aktuell laufende und durch Bund und Länder geförderte Forschungsprojekte. Dies sind z. B. seit 2022 „TerraBayt“ der Technischen Universität München⁷⁵, seit 2018 „Landwirtschaft 5.0“ unter Federführung der Hochschule Offenburg⁷⁶ oder seit inzwischen mehr als zehn Jahren fortlaufende Studien der Uni Gießen⁷⁷. Bei den aktuell laufenden Forschungsprojekten geht es v. a. um die Effekte der Pflanzenkohle im Boden und deren Einfluss auf die Erträge landwirtschaftlicher Nutzpflanzen. Ebenso werden dabei Pyrolysebedingungen und der Einfluss verschiedener Brennstoffe auf die Effekte untersucht. Das bayerische TerraBayt-Forschungsvorhaben hat beispielsweise einen Projektzeitraum über die drei Jahre 2022, 2023 und 2024. Auf der Projektwebsite wird der Forschungsansatz wie folgt beschrieben: „Im Forschungsprojekt TerraBayt werden die Potenziale von

75 <https://www.oekolandbau.wzw.tum.de/forschung/projekte/terrabayt/> (zug. am 06.10.2023)

76 <https://fyi-landwirtschaft5.org/> (zug. am 21.07.2023)

77 https://www.uni-giessen.de/de/fbz/fb08/Inst/pflanzenoek/professur_expfloeko/index_html (zug. am 02.10.2023)

Pflanzkohle zur Kohlenstoffbindung und Treibhausgasminderung, zur Bodenverbesserung und Ertragssteigerung sowie als Anpassungsstrategie an den Klimawandel ermittelt. Grundlage der Untersuchungen sind Dauerfeldversuche in den Versuchstationen Roggenstein und Thalhausen der Technischen Universität München, Düngungsversuche auf Grünland (Baierlach) und Ackerland (Burghausen) sowie ein Düngungsversuch in der Obstbauversuchsanlage Hiltpoltstein, wodurch verschiedene Bewirtschaftungssysteme und Boden-Klima-Regionen Bayerns abgebildet werden.“⁷⁸ Die in Kapitel 4.4 angesprochene Förderung von Modellanlagen in Bayern durch das StMELF zeigt obendrein, dass das Thema Pyrolyse mit den anhängenden Prozessen und Synergien, wie Abwärmenutzung und die damit einhergehende Erstellung und Nutzung von CO₂-Zertifikaten inzwischen bei politischen Entscheidungsträgern angekommen ist und durch den Förderansatz von Modellprojekten künftig weiter wissenschaftlich und politisch im Sinne von lokaler und regionaler Lebensmittelsicherheit, Energieversorgung und zur Förderung der Kreislaufwirtschaft verfolgt werden wird.

Weiter verfolgt werden sollte die Betrachtung von Pyrolysatoren mit anderen Brennstoffen, nämlich organischen Abfällen, die im kommunalen Bereich ohnehin anfallen, was in der vorliegenden Arbeit noch nicht unternommen wurde. Je nach Kommune und deren speziellem Umfeld bieten sich hier verschiedene Brennstoffquellen an, die abhängig von Gewerbebetrieben, Industrie und Möglichkeiten der landwirtschaftlichen Betriebe am Ort sind. Auch dies sollte eine Aufgabe der kWP oder von staatlich geförderten Machbarkeitsstudien im Rahmen von Energienutzungsplänen sein, falls die energetische Biomassenutzung mittels Pyrolyse künftig mit öffentlichen Mitteln förderbar sein sollte.

Bildungsarbeit, Lobbyarbeit und Aufklärung bezüglich der synergistischen und positiven Effekte von Pflanzkohle durch Pyrolyse sollten verstärkt werden. An ersten Hochschulen und Universitäten ist das Thema, wie oben beschrieben, bereits im wissenschaftlichen Alltag angekommen. Lobbyarbeit wird bereits durch fachliche Verbände, wie z. B. durch den deutschen Fachverband Pflanzkohle e. V.⁷⁹ bei Kongressen, in (sozialen) Medien oder gegenüber der Politik betrieben. Weitere mögliche bayerische, technologieunabhängige Akteure für Lobby- und Bildungsarbeit

78 <https://www.oekolandbau.wzw.tum.de/forschung/projekte/terrabayt/> (zug. am 06.10.2023)

79 <https://fachverbandpflanzkohle.org/> (zug. am 06.10.2023)

könnten beispielsweise LENK⁸⁰ oder das „Centrale Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk - C.A.R.M.E.N. e. V.“⁸¹ sein, welche mit Studien, Onlinenewslettern und Infoveranstaltungen, die sowohl online als auch in Präsenz stattfinden, die interessierte Öffentlichkeit, infrage kommende Akteure aus dem Energiesektor und kommunale Fachstellen und Entscheidungsträger informieren könnten.

Zu guter Letzt kann auch noch empfohlen werden, dass Pyrolyseprojekte im globalen Süden durch das BMZ etabliert und gefördert werden, um global die NE innerhalb vieler Bereiche mit dieser Technologie vorwärts zu bringen.

80 <https://www.lenk.bayern.de/> (zug. am 04.10.2023)

81 <https://www.carmen-ev.de/> (zug. am 04.10.2023)

Quellen

Alvem, B.-M., Grönjord, R. (2017): Planting beds in Stockholm city - a handbook, City of Stockholm.

https://www.biochar.info/docs/urban/Planting_beds_in_Stockholm_2017.pdf

(zugegriffen am 19.09.2023)

Arrhenius, S. (1896): On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. Philosophical Magazine and Journal of Science, Series 5, Volume 41, S. 237-276.

Assmann, D. et al. (2018). SDG-Indikatoren für Kommunen - Indikatoren zur Abbildung der Sustainable Development Goals der Vereinten Nationen in deutschen Kommunen. Hrsg. Bertelsmann Stiftung, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Deutscher Landkreistag, Deutscher Städtetag, Deutscher Städte- und Gemeindebund, Deutsches Institut für Urbanistik, Engagement Global. Gütersloh. URL:

https://www.bertelsmann-stiftung.de/fileadmin/files/Projekte/Monitor_Nachhaltige_Kommune/SDG-Indikatoren_fuer_Kommunen_final.pdf (zugegriffen am

29.08.2023)

Averfalk, H. et al. (2021): Low-Temperature District Heating Implementation Guidebook. IEA DHC Report, 2021. DOI: 10.24406/publica-fhg-301176.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.) (2021a): Bayerns Klima im Wandel - Klimaregion Südbayerisches Hügelland. LfU. Augsburg April 2021.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.) (2021b): Klima-Faktenblätter Bayern - Klima der Vergangenheit und Zukunft. LfU. Augsburg Mai 2021.

Bayerisches Landesamt für Statistik (2022): Verfügbares Einkommen und Primäreinkommen der privaten Haushalte 1991 bis 2020. Kreisfreie Städte und Landkreise, Regierungsbezirke, Regionen.

https://www.statistik.bayern.de/mam/produkte/veroeffentlichungen/statistische_berichte/p1400c_202000.pdf (zugegriffen am 16.09.2023)

Bayerisches Landesamt für Statistik (2023): Statistische Berichte - Einwohnerzahlen am 31. März 2023, Gemeinden, Kreise und Regierungsbezirke in Bayern, Basis: Zensus 2011.

https://www.statistik.bayern.de/mam/produkte/veroeffentlichungen/statistische_berichte/a1200c_202341.pdf (zugegriffen am 19.08.2023)

Beuermann, C. (2023): Vorreiter EU? Die europäische Klimapolitik. Bundeszentrale für politische Bildung (bpb). Online. <https://www.bpb.de/themen/klimawandel/dossier-klimawandel/509723/vorreiter-eu-die-europaeische-klimapolitik/> (zugegriffen am 10.10.2023)

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2022): Richtlinie für die Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen (BEG EM). In: Bundesministerium der Justiz (Hrsg.). Bundesanzeiger BAnz AT 30.12.2022 B1, Dezember 2022.

Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) (2022): Folgen des Klimawandels. <https://www.bmz.de/de/themen/klimawandel-und-entwicklung/folgen-des-klimawandels-124774> (zugegriffen am 27.06.2023)

Bundeszentrale für politische Bildung (2023): Klimawandel – die gestörte Balance. <https://www.bpb.de/themen/klimawandel/dossier-klimawandel/517115/klimawandel-die-gestoerte-balance/> (zugegriffen am 10.06.2023)

CIEL (2023): Lost in Translation - Lessons from the IPCC's Sixth Assessment on the Urgent Transition from Fossil Fuels and the Risks of Misplaced Reliance on False Solutions. Center for International Environmental Law & Heinrich Böll Stiftung. <https://www.ciel.org/wp-content/uploads/2023/03/Lost-in-Translation-Lessons-from-the-IPCCs-Sixth-Assessment.pdf> (zugegriffen am 18.08.2023)

dena Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.) (2022): DENA-GEBÄUDEREPORT 2023. Zahlen, Daten, Fakten zum Klimaschutz im Gebäudebestand. https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2022/dena_Gebaeudereport_2023.pdf (zugegriffen am 02.06.2022)

- Deutsche Bundesregierung (2021): Bericht über die Umsetzung der Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung. Freiwilliger Staatenbericht Deutschlands zum HLPF 2021. <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975292/1942876/8cbe869f941690f1f9455c57274a74db/bericht-ueber-die-umsetzung-der-agenda2030-fuer-nachhaltige-entwicklung-download-bpa-data.pdf?download=1> (zugegriffen am 16.09.2023)
- Díaz, S. et al. (2018): Assessing nature's contributions to people. *Science*, 359 (6373), pp. 270 - 272. DOI: 10.1126/science.aap8826
- Ding, Y. et al. (2016): Biochar to improve soil fertility. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 36: 36. DOI 10.1007/s13593-016-0372-z
- DUH (2021): Energetische Biomassenutzung. Positionspapier der Deutschen Umwelthilfe. https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Energiewende/Positionspapier_Biomasse_220202_final.pdf (zugegriffen am 04.10.2023)
- EBC (2020): Zertifizierung des C-Senken Potentials von Pflanzenkohle, Ithaka Institute, Arbaz, Switzerland. (<http://european-biochar.org>). Version 2.1D vom 25. Januar 2021
- EBC (2023): European Biochar Certificate - Richtlinien für die Zertifizierung von Pflanzenkohle. Ithaka Institute, Arbaz, Switzerland. <http://www.european-biochar.org> Version 10.3G vom 5. April 2023
- Felixberger, J. K. (2017): *Chemie für Einsteiger*. Springer Spektrum. Berlin.
- Fleming, R. J. (2018): An updated review about carbon dioxide and climate change. *Environ Earth Sci* 77, 262. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7438-y>
- Foster, G., Royer, D., Lunt, D. (2017): Future climate forcing potentially without precedent in the last 420 million years. *Nat Commun* 8, 14845. <https://doi.org/10.1038/ncomms14845>
- Gehr, D. (2024): *Grüne Infrastrukturen in urbanen Räumen klimatisch gemäßigter Breiten. Einfluss auf die Erfüllung von Indikatoren der SDGs*, München, GRIN Verlag, <https://www.grin.com/document/1438359>

- Gerber, H. (2009): Biomassepyrolyse mit PYREG-Reaktor. Journal für Ökologie, Weinbau und Klimafarming. ISSN 1663-0521.
<https://www.ithaka-journal.net/pyrolysereaktor> (zugegriffen am 27.08.2023)
- Glaser B., Birk J. J. (2012): State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (terra preta de Índio). Geochim. Cosmochim. Acta 82:39 - 51. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.11.029>
- Greenpeace (2022): Energiepolitik auf dem Holzweg. Warum die industrielle Verbrennung von Bäumen gestoppt werden muss!
https://www.greenpeace.de/publikationen/S04171_gp_Report_Energiepolitik_auf_dem_Holzweg_08_2022_0.pdf (zugegriffen am 02.10.2023)
- Hamilton, J. D. (2009): Causes and Consequences of the Oil Shock of 2007-08. Brookings Papers on Economic Activity, Economic Studies Program, The Brookings Institution, 40, S. 215-283. DOI 10.3386/w15002.
- Hauff, M. v. (2019): Nachhaltigkeit in der Entwicklungszusammenarbeit. Studienbrief Nr. 0110 des Fernstudiengangs „Nachhaltige Entwicklungszusammenarbeit“ der RPTU Kaiserslautern Landau.
- Hennicke, P. et al. (2020): Nachhaltige Energieversorgung. Studienbrief Nr. 0810 des Fernstudiengangs „Nachhaltige Entwicklungszusammenarbeit“ der RPTU Kaiserslautern Landau.
- Hubbert, M. K. (1949): Energy from fossil fuels. Science, 109 (2823), DOI: 10.1126/science.109.2823.103.
- Hubbert, M. K. (1956): Nuclear energy and the fossil fuels. In: Meeting of the Southern District, Division of production, American Petroleum Institute, San Antonio, Texas. Shell Development Company.
- IEA (2023): Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach. IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach>, License: CC BY 4.0 (zugegriffen am 8.10.2023)

- IPCC (2014): Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf
(zugegriffen am 04.06.2023)
- IPCC (2021): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (2022a): Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- IPCC (2022b): Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Joseph, S. et al. (2021): How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar. *GCB Bioenergy*, 13, S. 1731 - 1764. DOI: 10.1111/gcbb.12885.
- Katzer, F., 1903. Grundzüge der Geologie des unteren Amazonasgebietes (des Staates Pará in Brasilien). M. Weg, Leipzig, Deutschland.

- Keeling, C. D. (1960): The Concentration and Isotopic Abundances of Carbon Dioxide in the Atmosphere. *Tellus*. Volume 12, Nr. 2, 1960, S. 200–203.
- Keller, T. et al. (2019): Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil and Tillage Research*, Vol. 194, November 2019, 104293. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>
- Lenton, T.M. et al. (2008): Tipping Elements in the Earth's Climate System. *PNAS*, Vol. 105, No. 6, 1786 - 1793. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0705414105
- LWF (2014): Der Energiegehalt von Holz. Merkblatt 12 der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. Juni 2014.
<https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/mb-12-energiegehalt-holz.pdf> (zugegriffen am 12.07.2023)
- Martens, J. (2017): Agenda 2030 kommunal. Die Umsetzung der UN-Nachhaltigkeitsziele in Städten und Gemeinden. Global Policy Forum Europe e. V. https://www.globalpolicy.org/sites/default/files/GPF-Briefing_1117_Agenda2030_kommunal.pdf (zugegriffen am 28.08.2023)
- MCC (2023): CO₂-Bepreisung zur Erreichung der Klimaneutralität im Verkehrs- und Gebäudesektor: Investitionsanreize und Verteilungswirkungen. Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC) gGmbH.
https://www.mcc-berlin.net/fileadmin/data/C18_MCC_Publications/2023_MCC_CO2-Bepreisung_Klimaneutralit%C3%A4t_Verkehr_Geb%C3%A4ude.pdf (zugegriffen am 28.02.2023)
- Murray, J., King, D. (2012): Oil's tipping point has passed. *Nature* 481, 433-435.
- Paetsch, L. et al. (2018): Wirkung karbonisierter organischer Reststoffe (Pyrolyse und hydrothermale Kohle) auf die Bodenfruchtbarkeit. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft. ISSN 1611-4159.
- Richardson, K. et al. (2023): Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Sci. Adv.* 9 (37). <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adh2458>
- Riedel, H. et al. (2022): SDG-Indikatoren für Kommunen - Indikatoren zur Abbildung der Sustainable Development Goals der Vereinten Nationen in deutschen Kommunen. In: Bertelsmann Stiftung, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Deutscher Landkreistag, Deutscher Städtetag, Deutscher Städte-

und Gemeindebund, Deutsches Institut für Urbanistik, ICLEI European Secretariat, Rat der Gemeinden und Regionen Europas / Deutsche Sektion (Hrsg.). 3., teilweise überarbeitete Auflage, Gütersloh 2022.

<https://backend.repository.difu.de/server/api/core/bitstreams/b51a884f-9e30-49c6-abfd-b35214537084/content> (zugegriffen am 18.08.2023)

Rockström, J. et al. (2009): A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 472–475.

<https://doi.org/10.1038/461472a>

Sachs, J. D. Et al. (2023): Implementing the SDG Stimulus. Sustainable Development Report 2023. Paris: SDSN, Dublin: Dublin University Press, 2023.

<https://doi.org/10.25546/102924>

Schwarz-Herion, O. (2015): Urgent Ecological Problems for the NSP. In: O. Schwarz-Herion, A. Omran (eds.): *Strategies Towards a New Sustainability Paradigm*. Springer International Publishing Switzerland.

Schwarz-Herion, O. (2018): Anthropogenic Climate Change and Countermeasures: Chances and Risks of Weather Modification Techniques and Climate Engineering (CE). In: A. Omran, O. Schwarz-Herion (eds.): *The Impact of Climate Change on Our Life*. Springer Nature Singapore Pte Ltd.

sfv (2019): Schwerpunkt CO₂ Rückholung. *Solarbrief* 03/21.

https://www.sfv.de/media/4026/download/Solarbrief_2021_03_Web.pdf?v=3

(zugegriffen am 11.07.2023)

Smith, P. (2016): Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies. *Global Change Biology*, 22, 1315 - 1324, doi: 10.1111/gcb.13178.

Smith, P. et al. (2019): Land-Management Options for Greenhouse Gas Removal and Their Impacts on Ecosystem Services and the Sustainable Development Goals. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 2019. 44: 255 - 286.

<https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-environ-101718-033129>

(zugegriffen am 04.06.2023)

Smith, S. M. Et al. (2023): *The State of Carbon Dioxide Removal - 1st Edition*. The State of Carbon Dioxide Removal. <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/W3B4Z>

- Statistisches Bundesamt (2023): Nachhaltige Entwicklung in Deutschland - Indikatorenbericht 2022. https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Nachhaltigkeitsindikatoren/Publikationen/Downloads-Nachhaltigkeit/indikatoren-0230001229004.pdf?__blob=publicationFile (zugegriffen am 22.09.2023)
- Stimm, K. et al. (2022): Energieholzmarkt Bayern 2020. Abschlussbericht. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/energieholzmarktbericht_2020.pdf (zugegriffen am 29.08.2023))
- Stockmann R., Meyer, W. (2017): Evaluation von Nachhaltigkeit. Studienbrief Nr. 1020 des Fernstudiengangs „Nachhaltige Entwicklungszusammenarbeit“ der RPTU Kaiserslautern Landau.
- Stuiver, M., Quay, P. D. (1981): Atmospheric ¹⁴C changes resulting from fossil fuel CO₂ release and cosmic ray flux variability. Earth and Planetary Science Letters, 53, 349 - 362.
- Supran, G., Rahmstorf, S., Oreskes, N. (2023): Assessing ExxonMobil's global warming projections. Science 379, eabk0063. DOI:10.1126/science.abk0063
- Teichmann, I. (2015): An Economic Assessment of Soil Carbon Sequestration with Biochar in Germany. DIW, Berlin. Discussion Papers. 1476. https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.502971.de/dp1476.pdf (zugegriffen am 27.08.2023)
- UBA (2016): Chancen und Risiken des Einsatzes von Biokohle und anderer „veränderter“ Biomasse als Bodenhilfsstoffe oder für die CSequestrierung in Böden. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_04_2016_chancen_und_risiken_des_einsatzes_von_biokohle.pdf (zugegriffen am 18.08.2023)
- UBA (2019): UBA-Kurzposition zur Kohlendioxid-Entnahme aus der Atmosphäre – Carbon Dioxide Removal (sogenannte „negative Emissionen“). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/dokumente/uba-kurzposition_zur_kohlendioxid-entnahme_aus_der_atmosphaere_2019.pdf (zugegriffen am 07.07.2023)

UBA (2022a): Carbon Capture and Storage.

<https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/gewaesser/grundwasser/nutzung-belastungen/carbon-capture-storage> (zugegriffen am 11.07.2023)

UBA (2022b): Kohlendioxid-Emissionsfaktoren für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/co2_ef_liste_2022_brennstoffe_und_industrie_final.xlsx (zug. am 11.07.2023)

UBA (2022c): Nature-based solutions and global climate protection. Assessment of their global mitigation potential and recommendations for international climate policy.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2022-01-03_climate-change_01-2022_potential_nbs_policy_paper_final.pdf (zugegriffen am 02.10.2022)

UBA (2023a): Abschlussbericht: Dekarbonisierung von Energieinfrastrukturen - ein politischer Unterstützungsrahmen für das Beispiel Wärmenetze. CLIMATE CHANGE 08/2023.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/cc_08-2023_dekarbonisierung_von_energieinfrastrukturen.pdf (zugegriffen am 04.06.2023)

UBA (2023b): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2023. CLIMATE CHANGE 28/2023.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/28_2023_cc_berichterstattung_unter_der_klimarahmenkonvention.pdf (zugegriffen am 13.07.2023)

UBA (2023c): Certification of Carbon Dioxide Removals - Evaluation of the Commission Proposal. CLIMATE CHANGE 13/2023.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/cc_13-2023_certification_of_carbon_dioxide_removals.pdf (zugegriffen am 28.02.2023)

- UBA (2023d): Carbon Capture and Storage Diskussionsbeitrag zur Integration in die nationalen Klimaschutzstrategien. position // september 2023.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/230919_uba_pos_ccs_bf.pdf (zugegriffen am 25.09.2023)
- UN (1998): REPORT OF THE CONFERENCE OF THE PARTIES ON ITS THIRD SESSION, HELD AT KYOTO FROM 1 TO 11 DECEMBER 1997. 25 March 1998. FCCC/CP/1997/7/Add.1. <https://unfccc.int/cop3/resource/docs/cop3/07a01.pdf> (zugegriffen am 12.06.2023)
- UN (2015a): Paris Agreement.
https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf (zugegriffen am 19.07.2023)
- UN (2015b): Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. UNITED NATIONS GENERAL ASSEMBLY: 70th Session, A/RES/70/1, New York.
- Voosen, P. (2023): Ship fuel rules have altered clouds and warmed waters - An unprecedented test of reverse geoengineering unfolds above the oceans. Science, Vol. 381, Issue 6657, S. 467f. <https://doi.org/10.1126/science.adk0831>
- WBGU - Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (2020): Landwende im Anthropozän: Von der Konkurrenz zur Integration. Berlin: WBGU.
- Weidlich, I. (2020): Wärmenetze. In: Kaltschmitt, M., Streicher, W., Wiese, A. (eds) Erneuerbare Energien. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-662-61190-6_16
- Werner, C. et al. (2018): Biogeochemical potential of biomass pyrolysis systems for limiting global warming to 1.5 °C. Environ. Res. Lett. 13 (2018) 044036.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabb0e>
- WMO (2019): WMO GREENHOUSE GAS BULLETIN. The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2018. No. 15 | 25 November 2019. ISSN 2078-0796. https://reliefweb.int/attachments/bb7e0523-53d6-38e0-9a5b-35bd98fddd97/GHG-Bulletin-15_en.pdf (zugegriffen am 08.06.2023)

Wunderling, N., et al. (2023): Global warming overshoots increase risks of climate tipping cascades in a network model. *Nat. Clim. Chang.* 13, 75–82 (2023).

<https://doi.org/10.1038/s41558-022-01545-9>

WWF (2023): Der Hammer-Heizungs-Deal. Eine Modellrechnung: Gasheizung vs. Wärmepumpe. WWF Deutschland, August 2023. <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Klima/der-hammer-heizungs-deal-modellrechnung-gasheizung-waermepumpe.pdf> (zugegriffen am 28.02.2023)

Ye, L. et al. (2020): Biochar effects on crop yields with and without fertilizer: A meta-analysis of field studies using separate controls. *Soil Use Manage.* 36: 2 - 18. DOI: 10.1111/sum.12546.

Anhang

Anhang: Diverse Emailkonversationen

Technisches zum Pyrolysator von Biomacon:

Von: th@biomacon.com <th@biomacon.com>

Gesendet: Freitag, 16. Juni 2023 13:12

An: Daniel Gehr

Betreff: Re: AW: Einige Fragen

Sehr geehrter Herr Gehr,

Danke für Ihre Mail.

Wenn Sie Betriebsstunden von 8000 annehmen dann würden sie eine C160-F benötigen.

Hierfür benötigen sie ca. 750t/a TS80% holzartigere Biomasse.

Die Kosten für die Pyrolyseanlage und das Kohleabfüllsystem liegen bei ca. 234.000€.

Für eine Gesamtanlage können Sie den Faktor 2 veranschlagen.

Hierbei würden Sie ca. 187t Pflanzkohle produzieren.

Melden Sie sich gerne bei Rückfragen.

Beste Grüße

Thomas Hoffmann

Antworten in Bezug auf Förderbarkeit

Von: Reiner Warsinski <Reiner.Warsinski@bafa.bund.de>

Gesendet: Donnerstag, 15. Juni 2023 11:35

An: Daniel Gehr

Betreff: AW: Förderbarkeit von Pyrolysatoren

Sehr geehrter Herr Gehr,

Ergänzung zu vorheriger Mailantwort:

Die Pyrolyseanlage und die nachgeschaltete stromerzeugende Anlage sind nicht förderfähig. Im Rahmen der BEW können Produktionsanlagen und Anlagen zur Stromerzeugung nicht gefördert werden.

Die Wärme aus der Pyrolyseanlage kann jedoch als Wärme aus Biomasse anerkannt werden. Die Anlage könnte daher Teil eines förderfähigen Wärmenetzes sein.

Die Ausgaben für die Anlage selbst und die Einbindung in das Wärmenetz sind allerdings nicht förderfähig. Die Ausgaben für die Trassen, Übergabestationen etc. könnten, falls das Gesamtkonzept den Förderbedingungen entspricht, förderfähig sein.

Sofern die Pyrolyseanlage klar von der Holzgas-KWK Anlage getrennt werden kann und diese auch ohne die KWK-Anlage genutzt werden könnte, wäre es möglich die Pyrolyseanlage als industriellen Produktionsprozess von Biokohle anzuerkennen. So könnte ein ggf. greifender Deckel für den maximalen Biomasseanteil umgangen werden. Allerdings wäre auch in diesem Fall die Pyrolyseanlage nicht förderfähig, da in Rahmen der BEW keine Produktionsanlagen (Abwärme liefernde Anlagen) gefördert werden. Dies gilt sowohl für Modul 1, als auch für die Module 2 und 3.

Freundliche Grüße

Reiner Warsinski

Von: TFZ-foerderung (tfz) <foerderung@tfz.bayern.de>

Gesendet: Dienstag, 20. Juni 2023 16:40

An: Daniel Gehr

Betreff: AW: Fördermöglichkeit Pyrolyse

Sehr geehrter Herr Gehr,

vielen Dank für Ihre Anfrage.

Soweit ich Ihr Vorhaben verstehe, planen Sie mit einem Pyrolyikator Pflanzenkohle zu erzeugen und die dabei anfallende Abwärme in einem Nahwärmenetz zu nutzen. Förderfähig sind bei BioWärme Bayern Biomasseheizwerke. Ziel der Förderung ist die effiziente Erzeugung von Wärme. Da bei einem Pyrolyikator nicht die Wärmeerzeugung im Vordergrund steht, können wir Ihnen leider keine Fördermöglichkeit im Rahmen von BioWärme Bayern in Aussicht stellen.

Für Rückfragen stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung.

Mit freundlichen Grüßen

Markus Grundner

Technologie- und Förderzentrum

im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ)

Eigenständigkeitserklärung

Dr. Gehr, Daniel

„Ich versichere, dass ich diese Masterarbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.“

Landsberg, 10.10.2023

Ort, Datum

Daniel Gehr

Unterschrift